



Hugo Macatrão Chicharro

Licenciado em Engenharia Civil

Modelação numérica da agitação marítima: O caso do Terminal XXI do Porto de Sines

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadora: Eng^a. Conceição Juana Espinosa Morais
Fortes, LNEC

Co-orientador: Prof. Doutora Maria da Graça Reis e Silva
de Oliveira Neves, FCT-UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio

Arguente: Prof. Doutor João Gouveia Aparício Bento Leal

Vogais: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes

Prof. Doutora Maria da Graça Neves



FACULDADE DE
CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE NOVA DE LISBOA

Dezembro de 2013

Hugo Macatrão Chicharro

Licenciado em Engenharia Civil

**Modelação numérica da agitação marítima:
O caso do Terminal XXI do Porto de Sines**

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Civil

Orientadora: Eng^a. Conceição Juana Espinosa Morais Fortes, LNEC
Co-orientador: Prof. Doutora Maria da Graça Reis e Silva de Oliveira Neves, FCT-
UNL

Júri:

Presidente: Prof. Doutor Válder José da Guia Lúcio
Arguente: Prof. Doutor João Gouveia Aparício Bento Leal
Vogais: Doutora Conceição Juana Espinosa Morais Fortes
Prof. Doutora Maria da Graça Neves

“Copyright” Hugo Macatrão Chicharro, FCT/UNL e UNL

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade Nova de Lisboa tem o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que seja dado crédito ao autor e editor.

AGRADECIMENTOS

Gostava de agradecer aos meus orientadores, Professora Maria da Graça Neves e Engenheira Juana Conceição Fortes pela disponibilidade, e por todos os conhecimentos que me transmitiram ao longo da realização deste trabalho. Gostava também de agradecer o facto de me terem proporcionado a oportunidade de realizar esta dissertação no Departamento de Hidráulica e Ambiente – Núcleo de Portos e Estruturas Costeiras, LNEC.

Agradece-se também ao Porto de Sines, S.A, a disponibilização dos dados de agitação marítima utilizados nesta dissertação.

Gostava também de agradecer ao Engenheiro Jorge Gadelho, Engenheiro Rui Reis, Engenheiro Diogo Neves e Engenheiro João Inverno por toda a vontade de ajudar e todos os conhecimentos transmitidos por eles bem como o espírito de interajuda saudável presente entre eles.

Finalmente, gostava de agradecer à minha família, António Chicharro, Virgínia Chicharro, Márcia Chicharro e Joana Terrinha por todo o apoio que me deram durante o meu percurso académico, sem eles não seria possível ter chegado até aqui.

RESUMO

O objetivo deste trabalho é a caracterização da agitação marítima ao largo de Sines e no interior da bacia portuária do Terminal XXI e análise da ressonância dessa bacia, recorrendo a modelos numéricos de propagação de ondas. Efetuou-se também a análise do desempenho desses modelos.

Assim, partindo de medições na boia-onógrafa ao largo de Sines no período de 1988 a 2012, caracterizou-se a agitação marítima ao largo e transferiu-se para a entrada do porto, com o modelo espectral SWAN e, para o interior do terminal, com o modelo de ondas regulares DREAMS. Os resultados da agitação marítima permitem concluir que as obras de proteção do terminal são eficazes na proteção da bacia portuária para os maiores valores de altura de onda significativa, levando a uma forte redução das alturas de onda desde o largo até ao interior da bacia.

Os modelos foram inicialmente validados com base em dados recolhidos entre 1 e 4 de Novembro de 2011. Da validação dos modelos conclui-se que SWAN representa bem a realidade em termos de altura de onda significativa e, período, sendo os dados medidos pelo ADCP em frente à praia de S. Torpes e os resultados do modelo nesse ponto, em geral, bastante semelhantes. Relativamente a DREAMS, conclui-se que em termos de altura de onda significativa, os resultados do modelo seguem, em geral, a agitação real medida pelo marégrafo localizado no interior da bacia.

Para a análise da ressonância da bacia portuária, DREAMS foi aplicado para um conjunto de períodos e direções de onda longa e determinam-se as curvas de resposta. Os resultados do modelo permitiram verificar que ocorrem fenómenos de ressonância principalmente para duas gamas de períodos de onda incidente, 140-240 s e 540 – 720 s, sendo o maior valor obtido para o período 160 s e direção 180° (S).

Termos chave: regime de agitação, modelação numérica, ondas curtas, ondas longas, ressonância, Porto de Sines, Terminal XXI

ABSTRACT

The purpose of this report is the analysis of the basin of Terminal XXI in Sines Harbour and the characterization of the sea wave regime offshore and inside Terminal XXI, using numerical models that allow the propagation of the wave conditions from offshore to the interior of port basins.

Therefore, based on measurements taken by a wave buoy deployed offshore of Sines harbour, measured between 1988 and 2012, the sea wave regime has been characterized and transferred to: the harbour's entrance, with the numerical model SWAN and; to the interior of Terminal XXI with the numerical model DREAMS. Based on the results of the wave regime, it was concluded that the protection works of Terminal XXI are effective on the protection of the port basin, from the highest values of significant wave height, contributing to a strong decrease in the wave height from offshore to the interior of the basin.

The models were initially validated, based on data gathered between the 1st and the 4th of November 2011. From the validation of the models, it was concluded that SWAN, represents the reality accurately as far as significant wave height and wave period are concerned, having the results measured by the ADCP, close to S. Torpes beach and the results obtained from the model at the same point, in general quite similar. Concerning to DREAMS, it was concluded that, in terms of significant wave height, the results of the model are similar the real wave conditions measured by the tide gauge placed inside the basin.

In what concerns to long waves, capable of generating resonance within the port basin of Terminal XXI, it was concluded from the results of Dreams, that resonance can occur mainly in two ranges of periods of the incident wave: 140-240 s and 540-720 s, being the highest value achieved in the 160 s period and for 180^0 (waves from south).

Keywords: wave regime, numerical modelling, short waves, long waves, resonance, Sines Harbour, Terminal XXI

ÍNDICE GERAL

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Enquadramento do Trabalho	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Metodologia.....	2
1.4	Estrutura da Dissertação	3
2	CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL.....	5
2.1	Caracterização geral	5
2.2	Caracterização do Terminal XXI.....	6
3	CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA COM O MODELO SWAN	9
3.1	Introdução.....	9
3.2	Descrição do modelo	9
3.2.1	Equação do balanço de energia	10
3.3	Condições de Aplicação	11
3.3.1	Batimetria, Condições de fronteira, Ventos e Marés.....	12
3.3.2	Domínio Computacional e Resolução das Malhas	13
3.3.3	Estabelecimento do ponto representativo do regime de agitação à entrada do Terminal XXI.....	14
3.3.4	Características das Simulações.....	16
3.4	Validação do modelo SWAN	16
3.4.1	Características das Simulações.....	16
3.4.2	Resultados	17
3.5	Caracterização da agitação marítima a entrada do terminal	21
3.5.1	Introdução.....	21
3.5.2	Regime observado ao Largo.....	22
3.5.3	Regime observado no ponto P5 obtido com modelo SWAN	25
4	CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA COM O MODELO DREAMS	31
4.1	Introdução.....	31
4.2	Descrição do modelo	31
4.3	Condições de Aplicação	33
4.3.1	Batimetria, Domínio de cálculo e malha de elementos finitos:.....	33
4.4	Ondas curtas	34
4.4.1	Introdução.....	34
4.4.2	Condições de fronteira.....	35
4.4.3	Análise do desempenho do modelo DREAMS	36

4.4.4	Regime de agitação no interior do Terminal XXI de 1988 a 2012.....	39
4.4.5	Condições de agitação incidente	40
4.5	Ondas Longas	42
4.5.1	Introdução.....	42
4.5.2	Condições de reflexão	42
4.5.3	Condições de agitação	42
4.5.4	Resultados	43
5	CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS	47
	BIBLIOGRAFIA.....	49

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Porto de Sines (Fonte: http://www.portodesines.pt/pls/portal/go).....	5
Figura 2 - Fotografia de Satélite do Terminal XXI (Google Earth©, 2013)	6
Figura 3 - Esquema de utilização de diferentes grelhas no modelo SWAN (adaptado do trabalho de Marco Miani e retirado de http://www.texample.net/tikz/examples/swan-wave-model).	10
Figura 4 - Batimetria da envolvente do Terminal XXI do Porto de Sines	12
Figura 5 - Localização da boia-ondógrafo (Sines1d)	13
Figura 6 - Localização dos pontos que delimitam a entrada do Terminal XXI do Porto de Sines.....	15
Figura 7 - Comparação da altura significativa H_s nos pontos de igual coordenada y	15
Figura 8 - Comparação da altura significativa H_s nos pontos com igual coordenada x.....	16
Figura 9 - Localização do ADCP	17
Figura 10 - Comparação da altura significativa H_s no modelo SWAN e ADCP	17
Figura 11 - Comparação do período de pico T_p no modelo SWAN e ADCP.....	18
Figura 12 - Comparação da direção média do período de pico θ_p no modelo SWAN e ADCP.....	18
Figura 13 - Rosa de direções (numéricos e medidos) no local do ADCP na praia a sul do Porto de Sines	19
Figura 14 - Altura significativa H_s ao Largo, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012	22
Figura 15 - Período de pico T_p ao Largo, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012	22
Figura 16 - Direção de pico θ_p ao Largo, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012	23
Figura 17 - Rosa de direções na boia do Porto de Sines	23
Figura 18 - Histograma geral do conjunto H_s - T_p ao Largo do Porto de Sines	24
Figura 19 - Histograma geral do conjunto H_s - θ_p na boia do Porto de Sines	24
Figura 20 - Histograma geral do conjunto T_p - θ_p na boia do Porto de Sines	25
Figura 21 - Comparação da altura significativa H_s no P5 e a boia, no período entre 2005 a 2012.....	26
Figura 22 - Comparação do período de pico T_p no P5 e ao Largo, no período entre 1988 e 2012.....	26
Figura 23 - Comparação da direção de pico θ_p no P5 e ao Largo, no período entre 1988 e 2012.....	27
Figura 24 - Rosa das direções: Comparação da direção de pico θ_p no P5 e ao Largo.....	27
Figura 25 - Histograma geral do conjunto H_s - T_p no Ponto P5.....	28
Figura 26 - Histograma geral do conjunto H_s - θ_p no ponto P5.....	28
Figura 27 - Histograma geral do conjunto T_p - θ_p no ponto P5.....	29
Figura 28 - Comparação das direções de pico registada na boia e ponto P5 separadamente para os períodos de pico menores que 10 s, entre 10 s e 15 s e maiores que 15 s	30
Figura 29 - Configuração do Terminal XXI: Configuração 1 A (Fevereiro de 2011) e Configuração 1B (Dezembro de 2012) (APS).....	33
Figura 30 - Configuração do Terminal XXI, em maio de 2011. Imagem (Google Earth©) e desenho da configuração (APS).	33
Figura 31 - Batimetria e malha de elementos finitos na zona interior do Terminal XXI.....	34
Figura 32 - Localização dos pontos para obtenção dos resultados do modelo DREAMS	34
Figura 33 - Troços de fronteiras e batimetria da bacia portuária do Terminal XXI do Porto de Sines.	35
Figura 34 - Localização do marégrafo instalado no Terminal XXI do Porto de Sines (fonte: IH).	37
Figura 35 - Comparação da altura significativa H_s no modelo DREAMS e Marégrafo.....	38
Figura 36 - Comparação do período de pico T_p no modelo DREAMS e Marégrafo.....	38
Figura 37 - Altura significativa H_s no Terminal XXI, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012	41
Figura 38 - Período de pico T_p no Terminal XXI, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012... ..	41

Figura 39 - Curvas de resposta para o ponto PD1, nível de maré de 2.0 m ZH, período de 140 s a 240 s e direção entre 180° (S) e 270° (W).....	43
Figura 40 - Curvas de resposta para o ponto PD1, nível de maré de 2.0 m ZH, período de 540 s a 720 s e direção entre 180° (S) e 270° (W).....	44
Figura 41 - Amplificação da onda para T= 160 s e T= 720 s, direção de onda de 180° (S), nível médio de maré 2.0 m ZH.....	44

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1- Condições iniciais de agitação	14
Tabela 2 - Diferenças máximas, Δ_{Max} , entre H_s , T_p e θ	14
Tabela 3 - Tempo de cálculo (Intel® Core™ i5-3210M CPU @ 2.50 GHz 2.50 GHz)	14
Tabela 4 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições do ADCP.....	20
Tabela 5 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições do ADCP.....	20
Tabela 6 - Dados de condições de fronteira imposta no modelo SWAN de modo a simular a agitação desde o largo até ao exterior do Terminal XXI do Porto de Sines	21
Tabela 7 - Parâmetros estatísticos da agitação marítima registada pela boia	25
Tabela 8 - Parâmetros Estatísticos da agitação Marítima no Ponto P5	29
Tabela 9 - Terminal de Contentores. Características dos troços da fronteira da bacia portuária.	36
Tabela 10 - Valores dos coeficientes de reflexão nos troços da fronteira dos domínios de cálculo.....	36
Tabela 11 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo DREAMS e as medições do marégrafo	39
Tabela 12 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições do ADCP ...	39
Tabela 13 - Dados de agitação na entrada do domínio do modelo DREAMS	40
Tabela 14 - Dados de agitação na entrada do domínio do modelo DREAMS	40
Tabela 15 - Parâmetros estatísticos da agitação marítima no interior do Terminal XXI	42
Tabela 16 - Dados de agitação na entrada do domínio do modelo DREAMS	43
Tabela 17 - Principais períodos de ressonância, T_r , direção, θ , e coeficiente de amplificação, H/H_0 , obtidos em todos os pontos do domínio de cálculo.....	45

LISTA DE SÍMBOLOS

C	Velocidades de propagação no espaço
C_g	Velocidade de fase ou celeridade da onda
(c_x, c_y)	Velocidade de grupo
(c_θ, c_σ)	Velocidades de propagação no espectro
DIR	Direção média do período de pico
$E(\sigma, \theta)$	Espectro densidade de energia
g	Aceleração da gravidade
H	Altura de onda
H_0	Altura significativa espectral
H_s	Altura significativa de onda
H/H_0	Índice de agitação, coeficiente de altura de onda ou fator de amplificação
h	Profundidade da água
k	Número de onda
N	Densidade espectral da ação de onda
Re	Número de Reynolds
S	Termo de fonte ou sumidouro
S_{ds}	Dissipação de energia da onda por rebentação parcial
S_{nl}	Transferência de energia entre componentes espectrais por interações ressonantes
S_{in}	Crescimento de onda por influência do vento
s	Desvio padrão amostral
T	Período de onda
T_m	Período medio
T_p	Período de pico
t	Variável tempo
x, y	Coordenadas horizontais

\bar{x}	Média aritmética
z	Coordenada vertical
θ	Direção de onda
θ_m	Direção média do período medio
θ_p	Direção média do período de pico
Φ	Potencial de velocidade, função das coordenadas (x,y,z,t)
ϕ	Potencial de velocidade, função das coordenadas (x,y)
η	Elevação da superfície livre
σ	Frequência relativa
ω	Frequência angular ou frequência absoluta

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ADCP	Acoustic Doppler Current Profiler
DIR	Direção
IH	Instituto Hidrográfico
NM	Nível de maré
ZH	Zero Hidrográfico

1 INTRODUÇÃO

1.1 Enquadramento do Trabalho

As ondas de longo período são frequentemente responsáveis por agitação significativa no interior dos portos, o que pode provocar danos nas estruturas portuárias e induzir movimentos excessivos nos navios amarrados.

Nas últimas décadas, têm sido realizados em Portugal diversos estudos de previsão e modelação numérica de ondas de modo a contribuir para a compreensão das origens dos fenómenos de ressonância na zona da bacia portuária do Terminal XXI do porto de Sines (Neves, 1996, Santos *et al.*, 2002, Neves *et al.*, 2004, Fortes *et al.*, 2009, Capitão *et al.*, 2013a e 2013b). Estes estudos incluem a análise das ondas de longo período medidas em diferentes bacias portuárias, incluindo a bacia portuária do Terminal XXI e estudos em modelo numérico da propagação da agitação marítima desde o largo até ao interior das bacias portuárias.

A bacia portuária do Terminal XXI do Porto de Sines é uma das bacias com problemas de ressonância. Dado que está em estudo a ampliação desta bacia, iniciaram-se recentemente estudos com o objetivo de analisar os efeitos da alteração de geometria nas condições de ressonância própria da bacia, e nas próprias condições de agitação de curto período no seu interior. Para tal, desde abril de 2011 existem dados disponíveis de séries temporais de registos de um marégrafo colocado no interior da bacia do Terminal XXI, além de dados tri-horários recolhidos pela boia-ondógrafo direcional do largo de Sines, o que permite estudar as características das ondas longas existentes no interior da bacia portuária e tentar relacioná-las com as ondas curtas ao largo. Para este estudo torna-se necessário validar os modelos numéricos a utilizar na propagação de ondas do largo até junto à entrada da bacia do Terminal XXI e daqui para o interior da bacia, com base em dados de campo medidos *in situ*. A contribuição do presente trabalho é a avaliação do desempenho dos modelos SWAN e DREAMS na propagação de ondas de curto e longo período.

1.2 Objetivos

O presente trabalho teve como principal objetivo a análise da ressonância da bacia portuária do Terminal XXI do Porto de Sines e a caracterização da agitação marítima de curto período ao largo de Sines e no interior do Terminal XXI.

Para alcançar este objetivo foram utilizados os modelos numéricos de propagação de ondas SWAN (Booij *et al.*, 1999), que permitem propagar as condições de agitação medidas na boia ondógrafo de Sines até à entrada da bacia portuária em estudo, e DREAMS (Fortes 1993), que permite estudar os modos ressonantes e as condições de agitação no interior da bacia portuária efetuando propagações da agitação da entrada da bacia para o seu interior.

Além disso, efetuou-se ainda uma análise do desempenho do modelo SWAN através da comparação dos seus resultados com dados medidos *in situ* no período de 1 a 4 de Novembro de 2011 por um perfilador acústico ADCP instalado em frente à praia de S. Torpes. Quanto ao modelo DREAMS, os seus resultados foram comparados com os dados de um marégrafo instalado no interior do Terminal XXI, no mesmo período de tempo.

1.3 Metodologia

A metodologia seguida neste trabalho passou pela utilização de modelos numéricos para o estudo da agitação marítima de curto (SWAN e DREAMS) e longo período (DREAMS) na zona marítima do Terminal XXI e pela utilização de dados medidos *in situ* (boia ondógrafo ao largo do porto de Sines, perfilador acústico ADCP em frente à praia de S. Torpes e marégrafo instalado no interior do Terminal XXI) para caracterização da agitação marítima ao largo do porto de Sines e para a análise do desempenho dos dois modelos numéricos.

Para este efeito, o trabalho iniciou-se com a caracterização da agitação marítima de curto período ao largo. Na coordenada ($37^{\circ}55'N$ e $08^{\circ}55'W$), ao largo do porto de Sines, mais propriamente na batimétrica dos -100 ZH, encontra-se uma boia-ondógrafo explorada pelo Instituto Hidrográfico (IH), denominada por Sines1d. Esta boia efetua medições de dados de agitação marítima desde 1988 e fornece os valores tri-horários dos parâmetros de altura de onda significativa (H_s), período de pico (T_p) e direção média correspondente ao período de pico. Com base nesses valores, é definido o regime de agitação marítima observado ao largo de Sines.

Para a definição do regime de agitação marítima de curto período no interior do Terminal XXI, efetuou-se a propagação da agitação marítima desde o largo até ao interior do porto, recorrendo a dois modelos numéricos: SWAN (Booij *et al.*, 1999) e DREAMS (Fortes, 1993). A utilização de dois modelos deveu-se ao facto de, dentro de porto, a reflexão das ondas nas suas fronteiras ser um dos fenómenos que condiciona as características da agitação marítima, fenómeno que não é corretamente simulado pelo modelo SWAN. Assim, recorreu-se ao modelo DREAMS, que tem em conta este fenómeno mas que só pode ser usado em zonas de pequena dimensão, dado o esforço computacional que envolve.

Sendo assim, a partir dos dados medidos pela boia-ondógrafo no período de 1988 a 2012, efetuaram-se cálculos primeiramente com o modelo SWAN, para a transferência desses valores para a entrada do Terminal XXI, definindo aí o regime de agitação marítima à entrada do terminal. Note-se que o estabelecimento das condições de aplicação do modelo SWAN, exigiu efetuar alguns cálculos de sensibilidade de modo a definir a resolução das malhas a utilizar pelo modelo bem como escolher o local representativo do regime de agitação marítima à entrada do terminal. Posteriormente, com o modelo DREAMS procedeu-se à transferência desse regime para o interior do Terminal e, mais concretamente, para o cais do terminal. É, assim, definido o regime de agitação marítima de curto período, no interior do Terminal XXI.

Previamente, para se verificar a aproximação dos resultados do modelo SWAN à realidade local, propagaram-se as condições de agitação desde o largo do porto de Sines até uma praia localizada a sul do Porto de Sines, onde existem dados de medições de um ADCP, localizado a $37^{\circ} 55'$ de latitude Norte e a $08^{\circ} 48'$ de longitude Oeste, no período de 1 a 4 de Novembro de 2011. Com base nesses resultados, efetuou-se a comparação dos parâmetros de agitação obtidos recorrendo às diferenças entre valores numéricos e medidos e aos parâmetros estatísticos: viés (BIAS), raiz do erro médio quadrático (RMSE), índice de concordância (IC) e índice de dispersão (SI).

De igual forma, para a análise do desempenho do modelo DREAMS, e para o mesmo período temporal (1 a 4 de novembro de 2011), foram transferidas as características da agitação obtidas na entrada do Terminal XXI (obtidas com o modelo SWAN) até ao seu interior e compararam-se os resultados obtidos pelo modelo DREAMS, com dados das medições do marégrafo instalado no seu interior.

Finalmente, efetuou-se uma análise da ressonância no interior do Terminal XXI, com o modelo DREAMS determinando as curvas de resposta (a variação do coeficiente de amplificação no interior da bacia em função do período da onda longa incidente) da bacia e identificando, deste modo, os respectivos períodos ressonantes.

1.4 Estrutura da Dissertação

Esta dissertação foi estruturada segundo a seguinte forma:

- Capítulo 1 – Introdução – Apresentação do enquadramento do problema e dos objetivos do trabalho;
- Capítulo 2 – Caracterização do local – Identificação das principais características do porto de Sines e, em particular, do Terminal XXI;
- Capítulo 3 – Caracterização da agitação marítima com o modelo SWAN – Descrição do modelo numérico de agitação, das suas condições de aplicação, análise do desempenho do modelo e definição do regime da agitação marítima na entrada do Terminal XXI;
- Capítulo 4 – Caracterização da agitação marítima de curto e longo período com o modelo DREAMS – Descrição do modelo numérico de agitação utilizado, das suas condições de aplicação, análise do desempenho do modelo, estabelecimento do regime de agitação marítima no interior do Terminal e análise das condições de ressonância no interior do Terminal;
- Capítulo 5 – Conclusões e desenvolvimentos futuros – Conclusões finais do trabalho efetuado e enumeração de possíveis abordagens em trabalhos futuros.

2 CARACTERIZAÇÃO DO LOCAL

2.1 Caracterização geral

O porto de Sines (Figura 1) fica localizado na costa oeste de Portugal continental, a 58 milhas náuticas a sul de Lisboa, no cruzamento das principais rotas marítimas internacionais Este-Oeste e Norte-Sul. A sua localização estratégica, aliada às suas características físicas, permitem posicioná-lo como o grande concentrador de cargas e linhas de navegação da fachada Ibero- Atlântica, a 37° 57' de latitude Norte e a 08° 53' de longitude Oeste.



Figura 1 - Porto de Sines (Fonte: <http://www.portodesines.pt/pls/portal/go>)

A sua construção teve início em 1973 e entrou em exploração em 1978. O objetivo inicial era receber os navios petroleiros de maior tonelagem e calado que, à data, se projetavam construir (até 1000000 tdw – *tones deadweight*). Pretendia-se, nessa altura, dotar o país de capacidades acrescidas de reservas de petróleo. Assim, associada à construção das infraestruturas portuárias, foi também prevista a construção de refinarias e oleodutos de distribuição dos produtos refinados, para outros pontos do país. Neste momento, o complexo do Porto de Sines é composto por várias infraestruturas marítimas para abrigo e acostagem, tornando-o num dos poucos portos europeus de águas profundas (de fundos naturais até -28 m ZH) permitindo a acostagem de navios de grande porte. Os elevados valores anuais de movimentação de mercadorias transformaram o porto de Sines no primeiro porto nacional em tonelagem anual movimentada.

É constituído pelos portos de pesca e de recreio, pelos terminais de granéis líquidos, petroquímico, multipurpose e ro-ro (*roll on-roll off*), de gás natural liquefeito e pelo terminal de contentores, denominado por Terminal XXI. Carateriza-se, assim, por modernos terminais especializados, por movimentar os diferentes tipos de mercadorias, estar aberto ao mar e contar com excelentes acessibilidades marítimas sem constrangimentos.

É o principal porto na fachada ibero-atlântica, cujas características geofísicas têm contribuído para a sua consolidação como ativo estratégico nacional, sendo, por um lado, a principal porta de abastecimento energético do país (petróleo e derivados, carvão e gás natural) e, por outro, posiciona-se já como um importante porto de carga geral/contentorizada com elevado potencial de crescimento para ser uma referência ibérica, europeia e mundial.

Este porto dispõe de um ordenamento de referência, livre de pressões urbanas, assegurando capacidade de expansão a longo prazo. Conta ainda com acessibilidades terrestres adequadas para o tráfego atual e com um plano de evolução rododiferroviário, que permitirá dar resposta às projeções futuras de crescimento do porto e da sua área de influência.

O Porto de Sines e a sua zona Industrial e logística de retaguarda, com mais de 2.000 ha, são já uma plataforma logística de âmbito internacional com capacidade para receber os grandes atores dos sectores marítimo-portuário, industrial e logístico e, no âmbito do Portugal Logístico, contará ainda com uma plena integração da plataforma urbana nacional do Poceirão e da plataforma transfronteiriça Elvas/Caia. (retirado de www.portodesines.pt).

2.2 Caracterização do Terminal XXI

O Terminal de Contentores de Sines (Figura 2), denominado Terminal XXI, iniciou operações em 2004, sendo operado em regime de concessão de serviço público pela empresa PSA Sines (PSA – *Port Singapore Authority*).

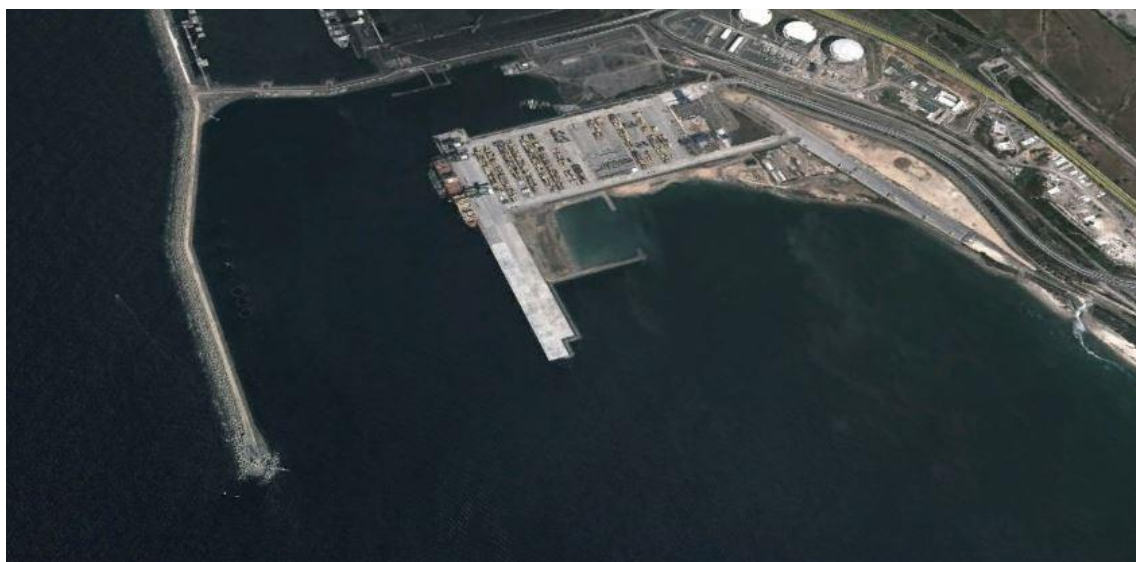


Figura 2 - Fotografia de Satélite do Terminal XXI (Google Earth©, 2013)

Com um plano de desenvolvimento faseado e sustentado, o Terminal XXI oferece fundos naturais até à cota -17.5 m ZH, permitindo a acostagem dos grandes navios porta-contentores das rotas transcontinentais.

Atualmente, com um comprimento de cais de 730 metros e dotado de 6 pórticos, o terminal tem uma área de armazenagem com 24 ha que permite disponibilizar uma capacidade total de 1.000.000 TEU (*Twenty-foot Equivalent Unit*) por ano.

A fase seguinte de desenvolvimento planeada pela PSA Sines compreenderá a construção de cais acostável com extensão útil de mais 210 metros, perfazendo um total de 940 metros. Tratar-se-á de aumentar a capacidade de movimentação do terminal para 1.500.000 TEU por ano.

No que respeita ao *hinterland* (região servida pelo porto), existem ótimas ligações diretas do Terminal XXI às redes nacionais rodoviárias e ferroviária, estando estas integradas no Eixo Prioritário nº16 Sines/Madrid/Paris da Rede Transeuropeia de Transportes. Por outro lado, para dar resposta às projeções de desenvolvimento deste Terminal, encontra-se em implementação um ambicioso plano de

evolução e expansão de acessibilidades rodoferroviárias, que permitirão garantir a correta intermodalidade para as ligações nacionais e ao interior de Espanha, particularmente à região de Madrid.

3 CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA COM O MODELO SWAN

3.1 Introdução

Neste capítulo será apresentada, primeiramente, a descrição do modelo SWAN, as condições de aplicação do modelo e a análise do desempenho do mesmo, efetuando uma comparação dos resultados numéricos com os valores medidos, no período de 1 a 4 de novembro de 2011, pelo perfilador acústico ADCP localizado na praia de São Torpes, a sul do porto de Sines.

Seguidamente, é efetuada a transferência das características da agitação marítima medidas na boia-ondógrafo de Sines desde Maio de 1998 até Junho de 2012, até à entrada do Terminal XXI do porto de Sines, efetuando aí a caracterização do regime de agitação marítima. Note-se que estas características da agitação marítima à entrada do Terminal XXI constituem os dados de entrada (*input*) no modelo DREAMS, o qual procederá à sua transferência para o interior do referido terminal.

3.2 Descrição do modelo

O modelo SWAN - acrónimo de *Simulating Waves Nearshore* – é um modelo numérico de agitação marítima baseado na equação para a conservação da ação de onda (Booij *et al.*, 1999; SWAN Team, 2008) que modela a geração, propagação e dissipação da energia das ondas do mar. É um modelo computacional de agitação espectral de terceira geração, com utilização aberta (*freeware*), em constante desenvolvimento pela Delft University of Technology da Holanda, que possui como uma das maiores vantagens a manutenção da estrutura dos ficheiros de dados e de resultados, o que permite a fácil atualização de versões mais robustas e completas do modelo, sempre que necessário.

O modelo SWAN é utilizado para obter estimativas do espectro de ondas em áreas costeiras, lagos e estuários, podendo utilizar como forçamento campos de vento e correntes fornecidos por outros modelos. Este modelo propaga a agitação marítima desde águas profundas até zonas costeiras e tem em conta os processos físicos de propagação no espaço geográfico, refração devida à variação da profundidade e correntes, empolamento devido a variações de fundo e presença de correntes, crescimento de onda por ação dos ventos, rebentação por influência do fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*), dissipação de energia devido ao atrito de fundo, interações não lineares (de grupos de três ondas e de grupos de quatro ondas), transmissão através de pequenos obstáculos e reflexões devidas a correntes opostas.

Uma das características mais importantes do SWAN é permitir descrever o espectro de agitação como o somatório de um número de ondas com diferentes frequências, numa determinada área. Este tipo de modelos são geralmente designados por modelos de terceira geração, tendo como base as formulações do modelo WAM (Komen *et al.*, 1994), com algumas adaptações que lhe permitem resolver os processos costeiros (Booij *et al.*, 1999).

Na resolução da evolução da agitação ao longo do tempo e do espaço, o modelo SWAN necessita de vários tipos de dados de entrada. De forma a tornar possível este processo, será sempre necessário fornecer ao modelo uma grelha batimétrica e uma grelha computacional, que poderão ser descritas em coordenadas cartesianas ou esféricas, juntamente com condições de fronteira e outros parâmetros de cálculo. Em complemento, poderão ser introduzidos outros tipos de dados para melhorar a modelação, tais como campo de ventos e correntes. Na Figura 3 encontra-se um esquema de múltiplas grelhas passíveis de serem utilizadas no modelo SWAN.

Existe ainda a hipótese de se implementar um sistema de malhas encaixadas, no qual as malhas exteriores, de menor resolução, servem de condição de fronteira para as malhas interiores, melhorando os resultados a obter na malha interior e poupando tempo de computação, em comparação com uma corrida de apenas uma malha de alta resolução em todo o domínio.

O SWAN é então capaz de fornecer múltiplos parâmetros referentes à agitação, em qualquer ponto do domínio de estudo.

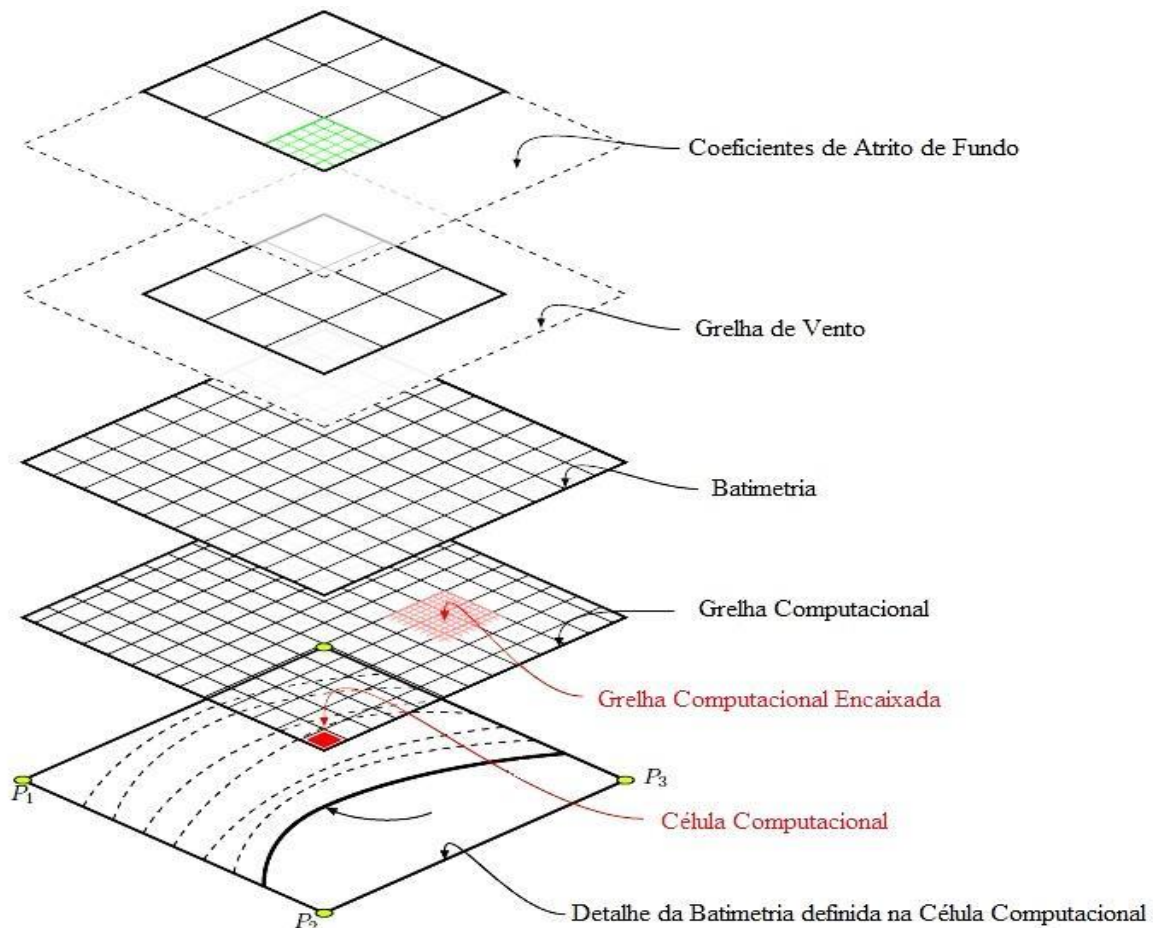


Figura 3 - Esquema de utilização de diferentes grelhas no modelo SWAN (adaptado do trabalho de Marco Miani e retirado de <http://www.texample.net/tikz/examples/swan-wave-model>).

3.2.1 Equação do balanço de energia

A descrição do modelo SWAN que na sequência se apresenta, seguiu Holthuisen (2007).

Sendo o SWAN um modelo de terceira geração, possui a capacidade de interpretar e tratar o espectro de agitação como a sobreposição de um conjunto de ondas numa determinada área, sendo que cada uma destas ondas é caracterizada por uma frequência própria. Isto permite que cada frequência seja resolvida individualmente a partir da teoria linear da onda.

Assim, torna-se possível obter a descrição estatística do campo de agitação através do espectro de variância de densidade ou pela variância da energia $E(\sigma, \theta)$ distribuindo a energia das ondas por frequências (neste caso frequências angulares em radianos – σ) e direcções de propagação (θ). De um modo geral, os modelos de agitação determinam a evolução da densidade do movimento $N(\vec{x}, t; \sigma, \theta)$

no espaço (\vec{x}) e no tempo (t). A utilização da densidade de movimento, $N = E/\sigma$, em detrimento da densidade de energia, E , prende-se com o facto deste se conservar durante a propagação na presença de correntes, de modo contrário ao que acontece com a densidade de energia (Komen *et al.*, 1994).

Para determinar o campo de ondas no tempo e espaço, o modelo SWAN recorre à equação de balanço espectral da ação da onda, normalmente para domínios de pequenas dimensões, representada na equação (1) para coordenadas cartesianas:

$$\frac{\partial N}{\partial t} + \frac{\partial (C_x N)}{\partial x} + \frac{\partial (C_y N)}{\partial y} + \frac{\partial (C_\sigma N)}{\partial \sigma} + \frac{\partial C_\theta N}{\partial \theta} = \frac{S}{\sigma} \quad (1)$$

onde a densidade espectral da ação da onda é definida como $N = N(\sigma, \theta) = E(\sigma, \theta)/\sigma$, em que c_x e c_y são as velocidades de propagação no espaço, e c_θ e c_σ representam as velocidades de propagação do espectro. O termo S representa as fontes ou sumidouros associados aos processos relativos ao crescimento, decaimento e redistribuição da energia da onda, dados pela equação (2):

$$S(\sigma, \theta) = S_{in}(\sigma, \theta) + S_{ds}(\sigma, \theta) + S_{nl}(\sigma, \theta) \quad (2)$$

em que, $S_{in}(\sigma, \theta)$ representa a aquisição de energia devido à acção do vento, $S_{ds}(\sigma, \theta)$ a dissipação por rebentação parcial, por atrito no fundo e por rebentação induzida pelo fundo $S_{nl}(\sigma, \theta)$ a transferência de energia entre componentes espectrais por interacções ressonantes a grupos de três e quatro ondas.

O modelo SWAN apresenta, como resultados, entre outros, em qualquer ponto do domínio, a altura significativa da onda H_s , o período de pico T_p , o período médio T_m , a direção de pico θ_p e a direção média θ_m .

Como qualquer modelo, este possui limitações na correta representação de um estado de agitação, que são devidas quer à formulação teórica em que o modelo se baseia, quer ao esquema numérico utilizado. Relativamente à formulação teórica, a principal limitação está relacionada com a calibração dos parâmetros envolvidos na descrição dos diferentes fenómenos físicos.

A calibração efetuada para o modelo SWAN utilizou dados da campanha JONSWAP, que foi realizada no Mar do Norte (Hasselmann *et al.*, 1973). Devido a este facto, por exemplo, os parâmetros utilizados no espectro de ondas ou na dissipação de energia por atrito de fundo estão calibrados para o Mar do Norte. Tais parâmetros poderão não estar corretos para áreas com diferentes características de clima de ondas (ondas associadas ao estado de mar de vaga e ondulação) ou diferentes características do fundo marinho.

Relativamente a aspetos numéricos, a inclusão da difração implica que o tamanho e o espaçamento da malha relativamente ao comprimento de onda seja tal que garanta a convergência dos cálculos computacionais. Tal implica que, por vezes, as malhas sejam de tão grande dimensão que podem inviabilizar a execução dos cálculos.

3.3 Condições de Aplicação

Descreve-se de seguida as principais condições de aplicação adotadas para a aplicação do modelo SWAN quer para a situação de validação do modelo, quer para a caracterização do regime de agitação marítima à entrada do Terminal XXI. Para a definição de algumas dessas condições (resolução da

malha e localização dos pontos a extrair), houve necessidade de efetuar uma análise de sensibilidade dos resultados do modelo à variação de alguns parâmetros.

3.3.1 Batimetria, Condições de fronteira, Ventos e Marés

Para executar o modelo SWAN é necessário introduzir diferentes dados de base tais como a batimetria, as condições de fronteira, os campos de ventos e as marés.

A batimetria (Figura 4) da envolvente do Terminal XXI do Porto de Sines foi obtida com base na informação fornecida pela Carta Náutica nº26408, do Instituto Hidrográfico, à escala 1:30000.

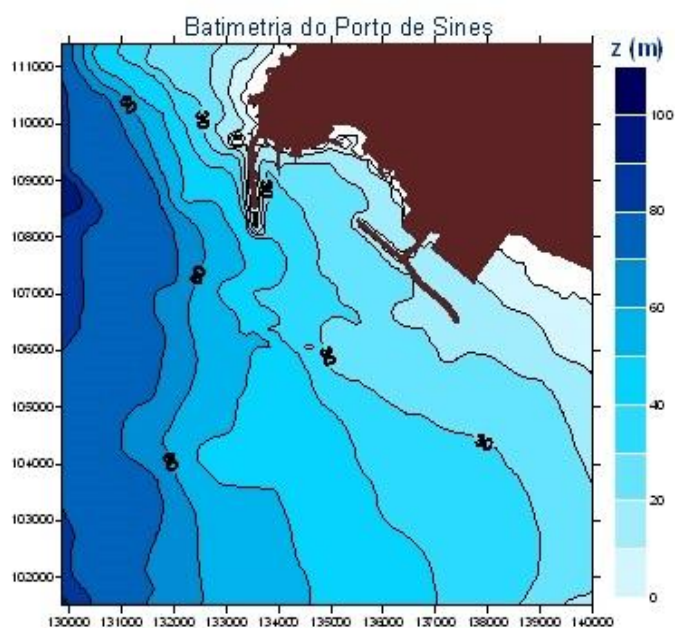


Figura 4 - Batimetria da envolvente do Terminal XXI do Porto de Sines

Na batimétrica dos -100 m ZH (Figura 5) está colocada uma boia-ondógrafo (Sines1d) explorada pelo Instituto Hidrográfico (IH) onde são registados diariamente os valores das características da agitação marítima desta zona, ou seja, os valores de H_{s0} (altura significativa de águas profundas), T_p (período de pico) e θ (direção de onda). O período de dados analisado no âmbito deste trabalho teve início em 26 de Maio de 1998 e fim a 30 de Junho de 2012, com uma periodicidade de aproximadamente 3 horas, exceto no caso de temporal ($H_s > 5m$), onde a periodicidade passa a ser de 0.5 hora. Estes constituirão os valores de condições de fronteira imposta ao modelo SWAN.

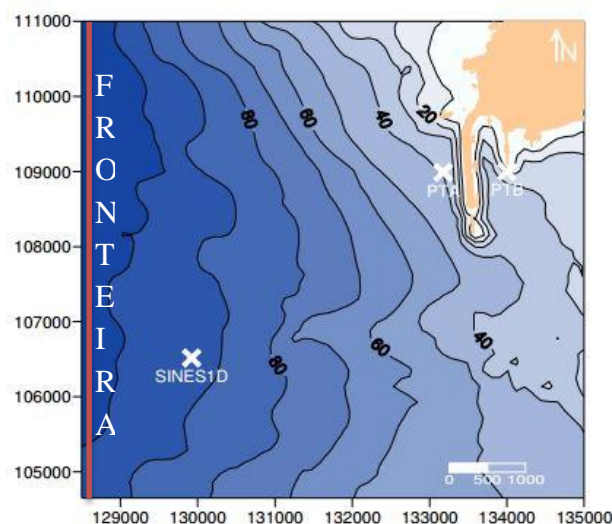


Figura 5 - Localização da boia-ondógrafo (Sines1d)

Neste estudo, o campo de ventos não foi considerado visto se tratar de um domínio de pequena dimensão em que a geração de ondas por vento local tem, em geral, menor intensidade que a agitação proveniente do Atlântico.

Relativamente ao nível de maré, este considerou-se como constante e igual ao nível de maré médio, de 2.1 m ZH. Esta simplificação foi o resultado de não ter sido obtida informação sobre este parâmetro em tempo útil.

Quanto à sobrelevação, e também por falta de informação, optou-se por um valor constante, o qual foi adicionado ao nível de maré. É de salientar que a sobrelevação do nível do mar retrata a subida temporária do nível do mar consequente das condições meteorológicas irregulares, nomeadamente de variações no campo da pressão atmosférica e/ou da ação de ventos fortes e prolongados. A diferença entre o nível observado e a altura da maré astronómica prevista definem este termo. Assim, no presente trabalho, para simplificação dos cálculos numéricos e com base nos dados disponíveis, optou-se por uma sobrelevação igual a 0.4 m, mesmo sabendo que esta não é constante no tempo, devido à variação dos fenómenos acima descritos.

3.3.2 Domínio Computacional e Resolução das Malhas

O modelo SWAN recorre ao método das diferenças finitas para resolver a equação de balanço espectral (equação 2), dividindo a área de estudo em elementos tão pequenos quanto se pretenda. Contudo, quanto maior esta divisão, maior o número de elementos e, consequentemente, maior será o esforço computacional e o tempo exigido para os cálculos. Neste trabalho optou-se por considerar malhas regulares retangulares inseridas num retângulo que abrange toda a envolvente do Porto de Sines, com um comprimento e uma largura de 10500 m (10.5 Km x 10.5 Km).

Para escolher uma dimensão de malha a utilizar que fosse um compromisso entre precisão de resultados e menor tempo de cálculo, foram analisados os resultados do modelo com malhas com espaçamento de 125 m, 100 m e 75 m, para as diferentes combinações de condições iniciais de agitação que se descrevem na Tabela 1.

Tabela 1- Condições iniciais de agitação

	Início	Fim	Passo
Hs(m)	1.00	9.00	2.00
Tp(s)	4.00	20.00	2.00
$\theta(^{\circ})$	180.00	320.00	20.00

As diferenças máximas (Tabela 2), ΔMax , entre as características da agitação (Hs, Tp e θ) obtidas entre malhas com diferente resolução, reduzem-se à medida que a malha é mais refinada, como seria de esperar, sendo a principal diferença destas o tempo de cálculo (Tabela 3). Posto isto, optou-se por uma malha de 100 m de espaçamento, uma vez que a diferença de resultados entre a malha com resolução de 100 m e 75 m é pouco significativa e o tempo de cálculo para a resolução de 75 m é praticamente o dobro do para a resolução de 100 m.

Tabela 2 - Diferenças máximas, ΔMax , entre Hs, Tp e θ

	ΔMax	ΔMax	ΔMax
	(125-100)	(100-75)	(125-75)
Hs(m)	0.75	0.54	1.22
Tp(s)	0.19	0.19	0.19
$\theta(^{\circ})$	14.80	29.20	29.20

Tabela 3 - Tempo de cálculo (Intel® Core™ i5-3210M CPU @ 2.50 GHz 2.50 GHz)

Resolução da malha	125(m)	100(m)	75(m)
Tempo(h)	8.00	11.00	20.00

3.3.3 Estabelecimento do ponto representativo do regime de agitação à entrada do Terminal XXI

Com base nas características da agitação marítima medidas na boia ondógrafo de Sines no período de Maio de 1998 a Junho de 2012, as simulações com o modelo SWAN permitem obter as características da agitação marítima na entrada do Terminal XXI, as quais constituem os dados de entrada (*input*) do modelo DREAMS, utilizado para obter as condições de agitação no interior do Terminal XXI. É, assim, necessário estabelecer um local que seja representativo do regime de agitação marítima à entrada do terminal.

Como referido, o modelo SWAN permite obter resultados em todo o domínio de cálculo e em pontos específicos pré-definidos.

No presente trabalho, para o estabelecimento desse local (que melhor representasse o regime de agitação marítima à entrada do Terminal XXI), efetuou-se um conjunto de cálculos preliminares com o modelo SWAN, obtendo-se as características da agitação marítima em 15 pontos ao longo de duas seções, conforme se indica na Figura 6. Os cálculos foram efetuados para as diferentes combinações de condições iniciais de agitação que se descrevem na Tabela 1.

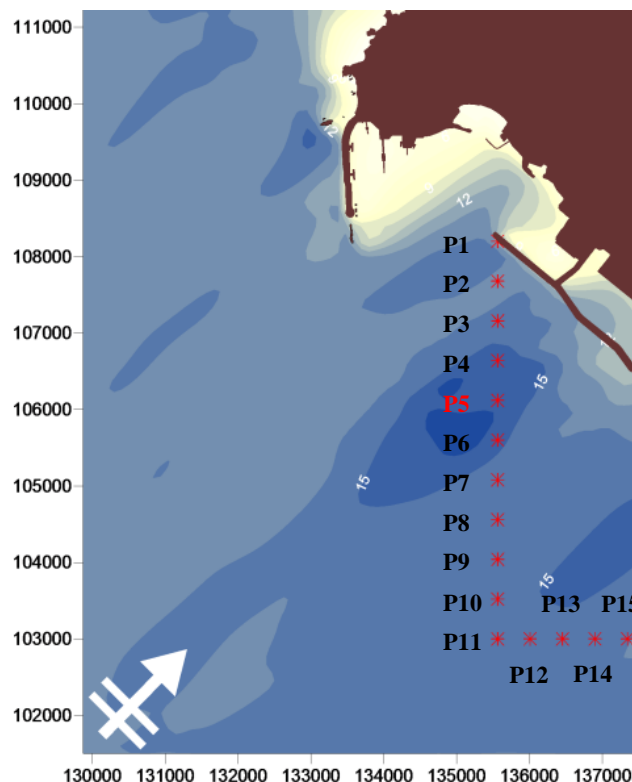


Figura 6 - Localização dos pontos que delimitam a entrada do Terminal XXI do Porto de Sines

Após uma análise dos resultados em termos de H_s (Figura 8 e 9), conclui-se que o ponto P5 foi onde ocorreu o maior valor deste parâmetro, $H_s = 10.52$ m e que não existem diferenças muito significativas relativamente aos outros pontos.

Assim, optou-se por utilizar o ponto P5 como local representativo do regime de agitação marítima à entrada do Terminal XXI. O ponto P5 tem coordenadas M,P (135564, 106120), e profundidade de aproximadamente -21 m ZH.

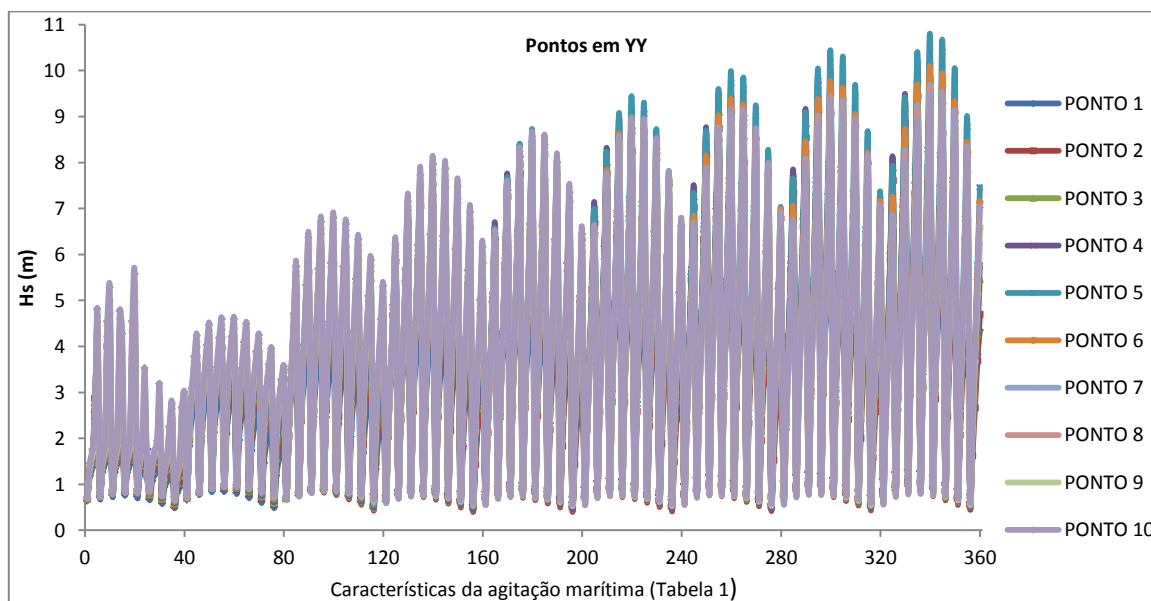


Figura 7 - Comparação da altura significativa H_s nos pontos de igual coordenada y

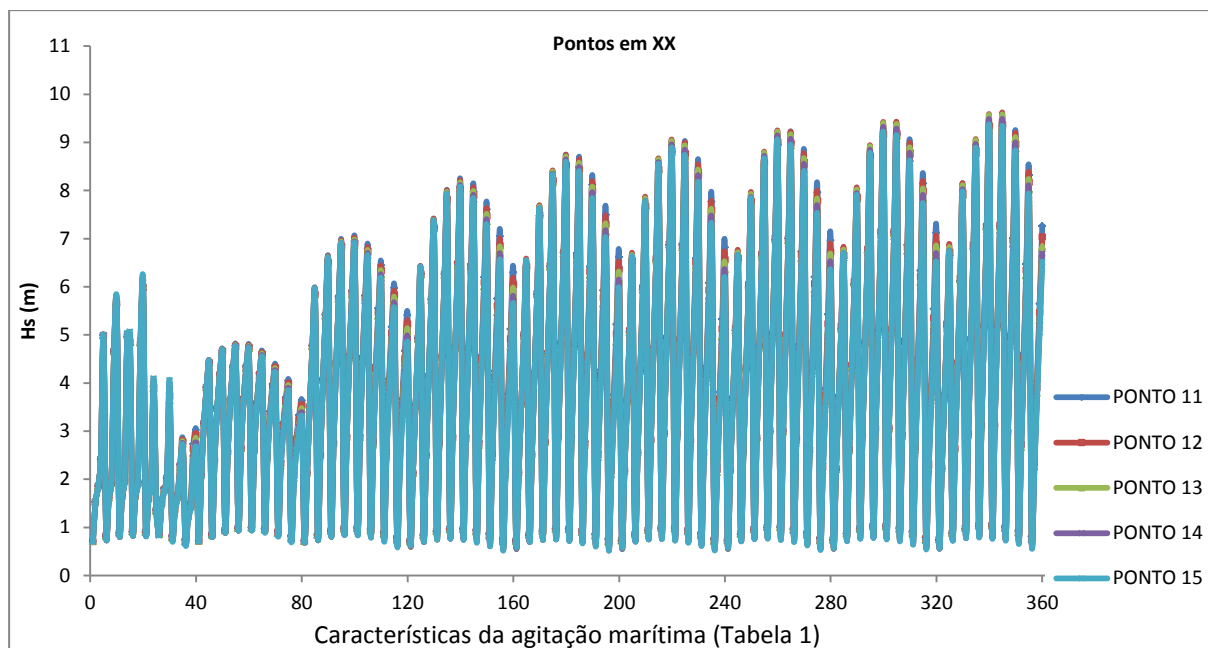


Figura 8 - Comparação da altura significativa H_s nos pontos com igual coordenada x

Note-se que para a análise do desempenho do modelo SWAN, em que foram realizadas comparações com medições *in situ* com um ADCP, o ponto escolhido para a obtenção dos resultados do modelo é o correspondente ao local de posicionamento do ADCP.

3.3.4 Características das Simulações

As principais características das simulações foram:

- Versão SWAN 40.72, sem considerar a interação com correntes nem ventos;
- Espectro direcional, com espectro em frequência de JONSWAP de 31 intervalos, de 0.02 a 0,5 Hz, com distribuição logarítmica, e discretização em direção que cobre 360°, dividida em 90 intervalos. O espectro é do tipo JONSWAP de modo a assumir os parâmetros obtidos na campanha do Mar do Norte;
- Coeficiente de rebentação constante de 0.65 para o período total;
- Inclusão dos fenômenos físicos de difração, interação não linear de grupos de três ondas (TRIAD) e rebentação induzida pelo fundo e por excesso de declividade (*whitecapping*). O atrito de fundo é considerado segundo a expressão semi-empírica de JONSWAP.

Note-se que os valores adotados para o espectro e coeficiente de rebentação são os indicados no manual do modelo SWAN.

3.4 Validação do modelo SWAN

3.4.1 Características das Simulações

Esta aplicação tem como objetivo a análise do desempenho do modelo SWAN na caracterização da agitação marítima na zona do porto de Sines, através da comparação de resultados numéricos com medições *in situ*.

Na zona em estudo, as medições *in situ* referem-se a medições efetuadas por um perfilador acústico ADCP – *Acoustic Doppler Current Profiler*, do Instituto Hidrográfico, localizado nas coordenadas 37°55'11"N 08°48'54"W (Figura 9), em frente à praia de São Torpes (localizada a sul do Terminal XXI) e fundeado a -18 m ZH. O período de medições considerado foi de 1 a 4 de Novembro de 2011 e foi possível obter, com base nos dados medidos, os valores de altura significativa, H_s , período de pico, T_p e direção média do período de pico, θ_p .

Com base nos valores dos parâmetros da agitação marítima na boia-ondógrafo de Sines nesse período (1 a 4 de Novembro de 2011) e nas condições de aplicação do modelo SWAN, efetuaram-se cálculos numéricos e obtiveram-se resultados (H_s , T_p e θ_p) no ponto onde está localizado o ADCP.

A comparação de resultados numéricos com as medições foi efetuada analisando as diferenças encontradas em relação à altura de onda significativa, H_s , ao período de pico, T_p , e à direção média do período de pico, θ_p , em termos de valores mínimos, máximos, média e desvio padrão. Recorreu-se também aos parâmetros viés (BIAS), a raiz do erro médio quadrático (RMSE), o índice de concordância (IC) e o índice de dispersão (SI).

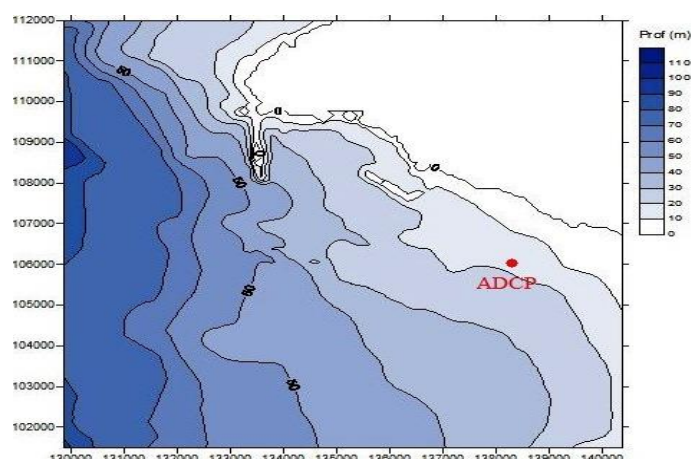


Figura 9 - Localização do ADCP

3.4.2 Resultados

Na Figura 10, Figura 11 e Figura 12 apresentam-se as séries temporais dos resultados obtidos pelo modelo SWAN e os dados recolhidos por ADCP para a altura de onda significativa, H_s , o período de pico, T_p , e a direção média do período de pico, θ_p , respetivamente.

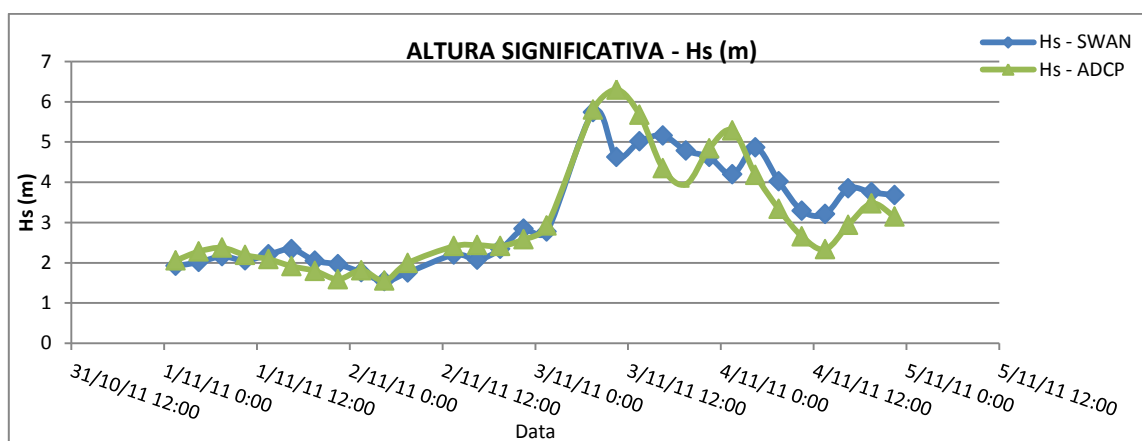


Figura 10 - Comparação da altura significativa H_s no modelo SWAN e ADCP

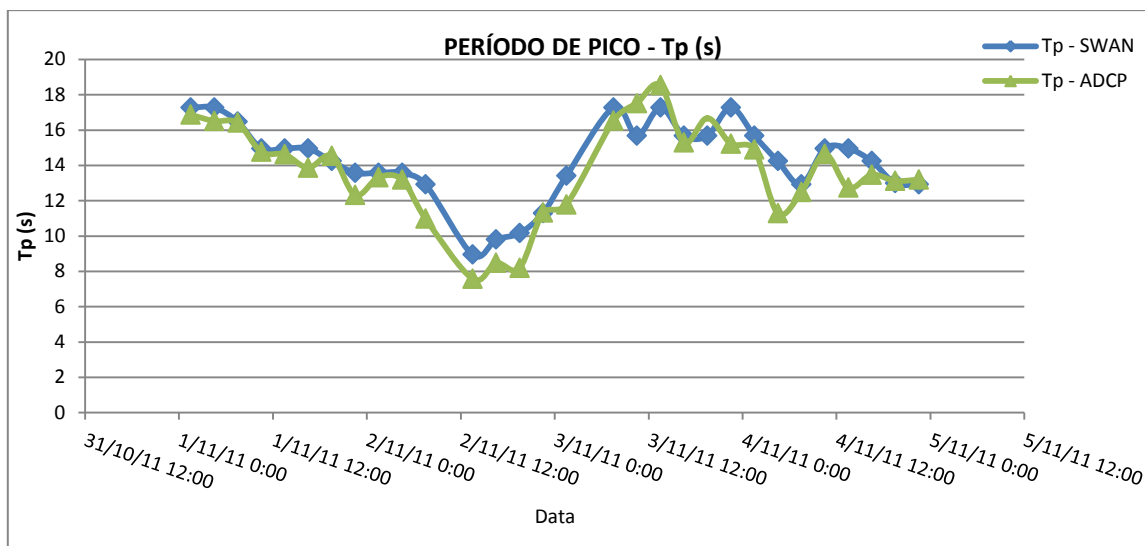


Figura 11 - Comparação do período de pico T_p no modelo SWAN e ADCP

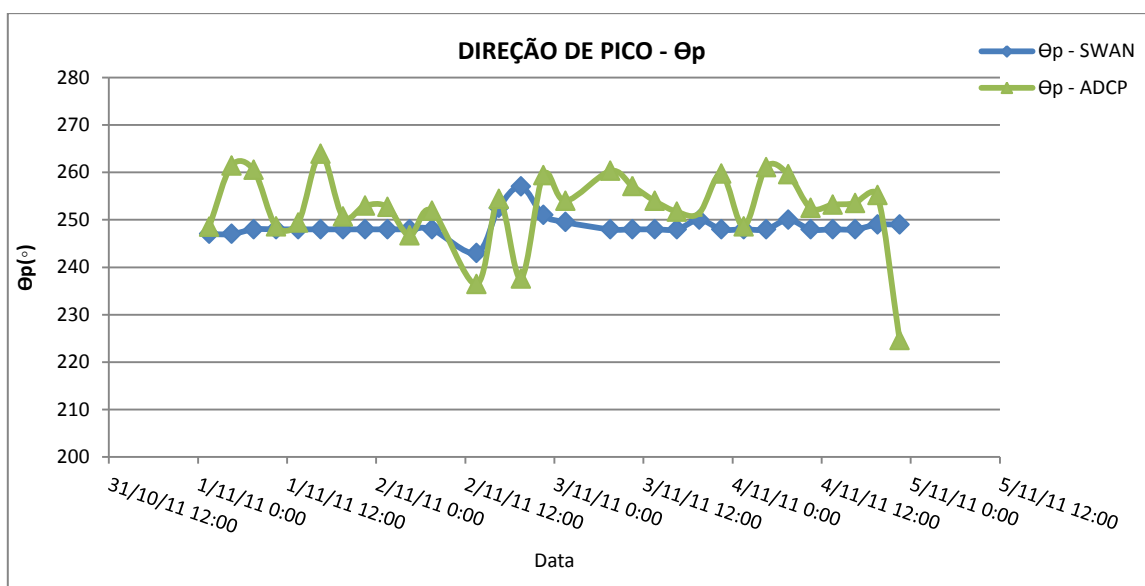


Figura 12 - Comparação da direção média do período de pico θ_p no modelo SWAN e ADCP

Da análise dos gráficos de comparação entre os dados medidos pelo ADCP na praia a sul do Porto de Sines e os resultados do modelo SWAN, verifica-se que o andamento geral e a ordem de grandeza de ambos os valores é bastante semelhante, principalmente no que diz respeito ao H_s e ao T_p . Em relação às direções, o modelo apresenta maiores dificuldades em reproduzir o andamento mais irregular dos valores medidos.

Com efeito, os resultados do modelo em termos de altura significativa H_s seguem a agitação real medida pelo ADCP, excetuando o dia 3 de Novembro de 2011 e as 12h seguintes, em que surgem algumas diferenças entre os valores medidos e numéricos. Em relação ao período de pico T_p nota-se também que os valores do período do modelo SWAN são muito próximos dos valores medidos pelo ADCP, o que leva a concluir que os resultados obtidos pelo modelo são bastante satisfatórios. Tal como para H_s , a maior diferença entre os valores do período medido pelo ADCP e o obtido no modelo numérico ocorre novamente no dia 3 e 12h seguintes.

Finalmente, em termos da direção de pico θ_p , verifica-se que os resultados numéricos não apresentam a variabilidade que se observa nos valores medidos. Com efeito, analisando a rosa das direções (Figura 13), notam-se algumas diferenças nos valores dos ângulos e é aqui que os resultados do modelo SWAN se distanciam mais dos dados medidos pelo ADCP.

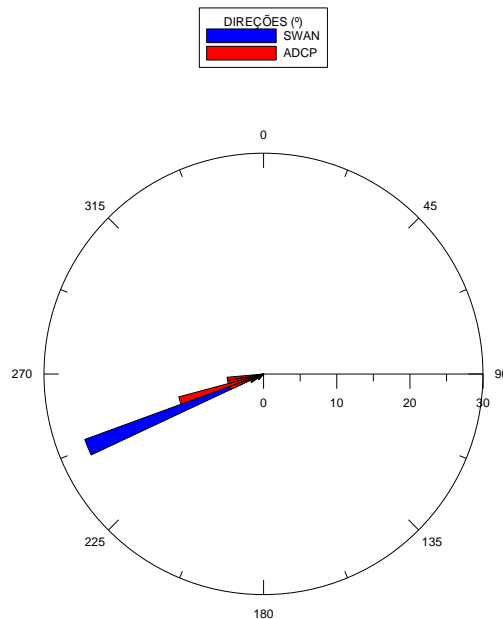


Figura 13 - Rosa de direções (numéricos e medidos) no local do ADCP na praia a sul do Porto de Sines

Para avaliar melhor as diferenças entre os resultados do modelo e os dados medidos pelo ADCP, efetuou-se uma breve análise estatística às diferenças encontradas em relação à altura significativa H_s , ao período de pico, T_p , e à direção de pico de onda θ_p , em termos de valores mínimos, máximos, média e desvio padrão (Tabela 4).

A medida mais comum da dispersão estatística é o desvio padrão, que mostra a variação ou dispersão existente em relação à média. O desvio padrão amostral, s , é uma ferramenta que permite obter a dispersão dos valores x_i da amostra total de n valores em torno da média \bar{x} e pode ser expresso por:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}} \quad (3)$$

Um baixo desvio padrão indica que os dados tendem a estar próximos da média, enquanto que valores altos indicam que os dados estão espalhados por uma gama maior de valores.

Por observação das diferenças apresentadas na Tabela 4, verifica-se que, em média, os resultados numéricos de altura de onda significativa, H_s diferem de apenas 44 cm face aos medidos (com um desvio de 38 cm). Já no que respeita aos períodos de pico, T_p a diferença é de 0.95 s (com um desvio de 0.77 s) e em termos de direção de pico, θ_p a diferença é de, aproximadamente, 7° (com um desvio de 5.23°).

Para a altura de onda significativa, H_s , a diferença máxima entre valores numéricos e medidos é de 1.68 m, enquanto para o período de pico T_p é de 2.95 s. A variação mais significativa é da direção de pico, θ_p , com um valor máximo de 24.40° , que ocorreu apenas no dia 5 de Novembro de 2011, embora na maioria dos casos a direção real é ligeiramente diferente da direção obtida com o modelo.

Tabela 4 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições do ADCP

Diferença	Hs(m)	Tp(s)	$\theta_p(^{\circ})$
Máximo	1.68	2.95	24.40
Mínimo	0.01	0.03	0.60
Média	0.44	0.95	7.27
Desvio Padrão	0.38	0.77	5.93
Nº de pontos total, n	30	30	30

Calcularam-se também quatro parâmetros estatísticos: o viés (BIAS), a raiz do erro médio quadrático (RMSE), o índice de concordância (IC) e o índice de dispersão (SI), dados pelas equações:

$$\text{BIAS} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)}{n} \quad (4)$$

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - x_i)^2}{n}} \quad (5)$$

$$\text{IC} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - x_i|^2}{\sum_{i=1}^n (|y_i - \bar{x}| + |x_i - \bar{x}|)^2} \quad (6)$$

$$\text{SI} = \frac{\text{RMSE}}{\bar{Y}} \quad (7)$$

onde x_i são os valores de referência (medidos pelo ADCP), y_i são os valores do modelo numérico, \bar{x} é a média dos valores de referência e n é o numero de pontos. Os índices de concordância variam de zero a um, sendo que quanto maior é o valor, maior é a concordância dos valores numéricos com os de referência. O erro médio quadrático corresponde a valores de erro absoluto, sendo a concordância dos valores numéricos com os de referência tanto melhor quanto menores forem os seus valores. O *scatter index* (SI) representa uma normalização do erro médio quadrático com a variável em estudo. Na Tabela 5 apresentam-se os parâmetros estatísticos BIAS, RMSE, IC e SI.

Tabela 5 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições do ADCP

	Hs(m)	Tp(s)	$\theta_p(^{\circ})$
BIAS	0.07	0.63	-3.82
RMSE	0.58	1.21	9.32
IC	0.93	0.90	0.23
SI	0.19	0.09	3.69

Os resultados do modelo numérico apresentam uma melhor concordância com os valores medidos em termos de altura de onda significativa, Hs, traduzidos por um valor de IC próximo de 1 e um valor de RMSE baixo (0.58). Verifica-se que o modelo sobrestima os valores medidos (0.07). Em relação ao

período de pico, T_p , e à direção de pico, θ_p , os valores de IC são menores face aos verificados para o parâmetro H_s enquanto que os valores de RMSE são significativamente maiores, principalmente no caso da direção de pico. O modelo sobrestima os valores medidos para o período de pico e subestima os valores medidos para a direção de pico. Em relação ao SI verifica-se que, em termos de altura de onda significativa e período de pico, existe realmente uma boa aproximação entre valores numéricos e medidos, mas já no caso da direção de pico estamos perante valores mais afastados dos valores registados pelo ADCP. Contudo, estes dados são meramente indicativos do erro cometido, uma vez que não foi efetuada qualquer calibração do modelo SWAN.

3.5 Caracterização da agitação marítima a entrada do terminal

3.5.1 Introdução

Para efetuar a caracterização da agitação marítima à entrada do Terminal XXI, utiliza-se como dados de base as medições realizadas pela boia ondógrafo Sines1d, no período de Maio de 1988 a Junho de 2012.

Uma vez que o número de medições é da ordem de 60240, a realização de simulações para cada estado de agitação com o modelo SWAN, exigiria um esforço computacional que não era compatível com os recursos disponíveis.

Assim, recorreu-se a matrizes de transferência calculadas *à priori*, que relacionam os valores da agitação marítima ao largo e a agitação no ponto à entrada do Terminal XXI. Tal implica a simulação *à priori* de um vasto leque de condições de agitação que cubra de forma adequada as combinações possíveis das quatro variáveis relevantes (H_s , T_p , θ_p e NM). Assim, com base nos valores da boia sines1D, estabeleceram-se as gamas de valores de H_s , T_p e θ_p que abrangem os valores mais significativos verificados nessa boia, bem como o intervalo constante entre valores para os quais se efetuarão os cálculos com o modelo SWAN, em relação ao NM considerou-se constante de 2.0 m. Na Tabela 6 estão representados os dados de condição de fronteira imposta no modelo SWAN.

Tabela 6 - Dados de condições de fronteira imposta no modelo SWAN de modo a simular a agitação desde o largo até ao exterior do Terminal XXI do Porto de Sines

	Início	Fim	Passo
$H_s(m)$	0.50	9.00	0.50
$T_p(s)$	4.00	22.00	2.00
$\theta_p(^{\circ})$	180.00	320.00	20.00

Tal implica 1440 simulações, um número bastante mais reduzido do que se se passasse 60240 valores.

Com os resultados obtidos, construiu-se uma matriz que permite interpolar eficazmente quaisquer outros casos não simulados, i.e., os 60240 valores medidos. Este método reduz drasticamente o tempo de cálculo necessário à transferência da agitação marítima da boia para a entrada do terminal.

Nas próximas seções apresenta-se o regime de agitação na boia e no ponto P5, à entrada do Terminal XXI.

3.5.2 Regime observado ao Largo

Para a caracterização do regime observado ao largo de Sines foram analisados os dados medidos na boia ondógrafo de Sines no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012. Na Figura 14, Figura 15 e Figura 16 apresentam-se as séries temporais de altura significativa, H_s , período de pico, T_p e direção de pico, θ_p , correspondentes a todos os registos da boia para o respetivo período.

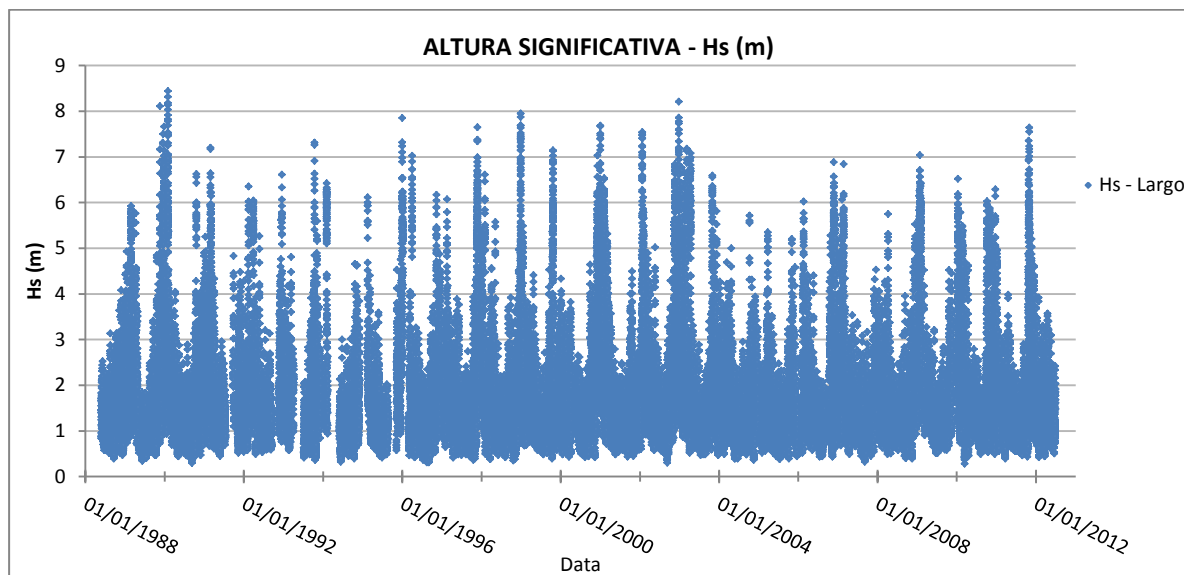


Figura 14 - Altura significativa H_s ao Largo, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012

Em termos de valores de H_s ao largo, neste período observou-se um valor máximo de 8.44 m, um mínimo de 0.28 m e valores médios de 1.2 m.

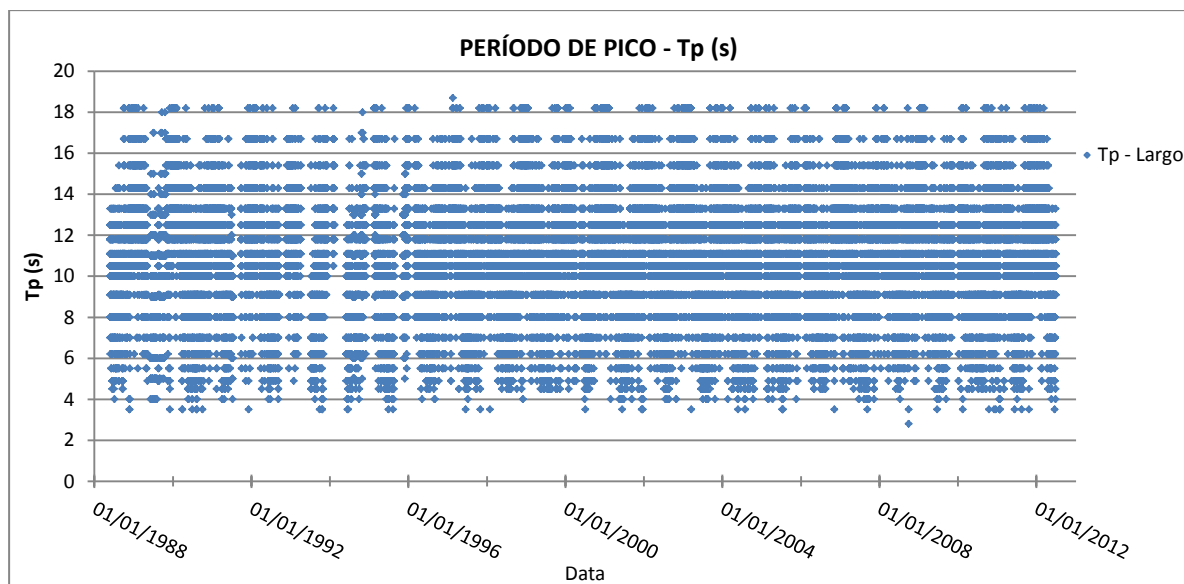


Figura 15 - Período de pico T_p ao Largo, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012

Em termos de valores de T_p ao largo, neste período observou-se um valor máximo de 18.70 s, um mínimo de 2.80 s e valores médios de 10.96 s.

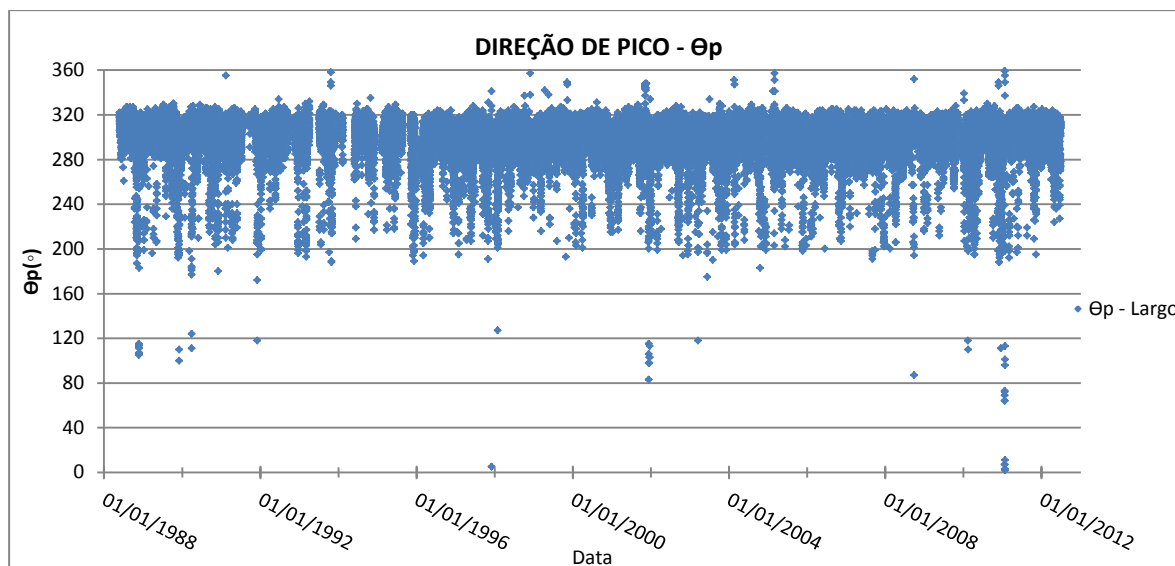


Figura 16 - Direção de pico θ_p ao Largo, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012

Em termos de valores de θ_p ao largo, neste período observou-se um valor máximo de 359 graus (norte), um mínimo de 2 graus (norte) e valores médios de 298 graus (oeste-noroeste).

Com o auxílio da rosa de direções (Figura 17), pode ver-se claramente que a direção predominante na boia ao largo do Porto de Sines é de aproximadamente 310° , o que corresponde à direção oeste-noroeste e que a dispersão em direção não é muito elevada.

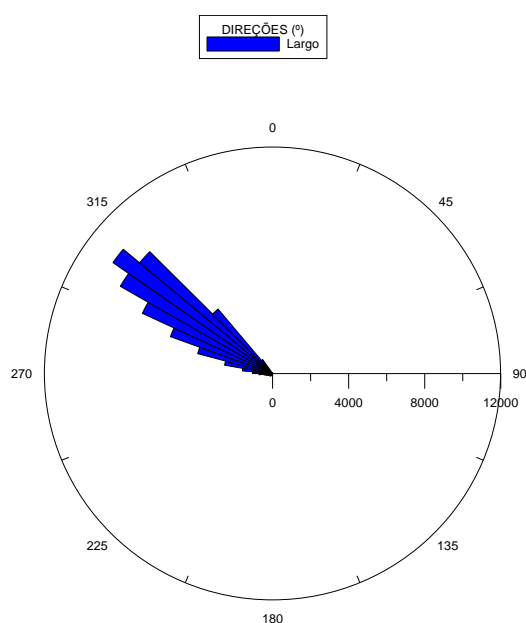


Figura 17 - Rosa de direções na boia do Porto de Sines

Outro tipo de gráficos que podem ser usados para apresentar os resultados do regime observado na boia, dando informação sobre os valores mais frequentes de cada parâmetro, são os histogramas. Nas Figuras 18 a 20 representam-se os histogramas para o regime observado na boia. O número total de dados dos histogramas ao largo, tal como referido, é de 60240.

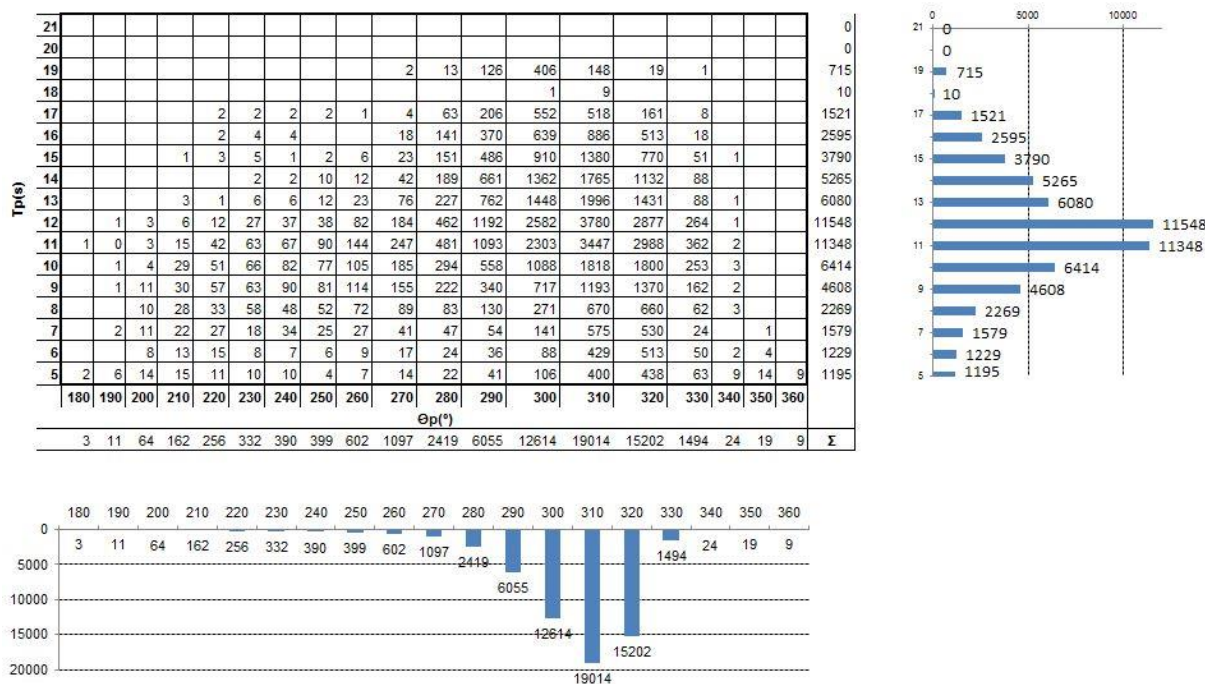


Figura 20 - Histograma geral do conjunto Tp-θp na boia do Porto de Sines

No histograma geral do conjunto Tp e θp, observa-se que a gama de valores mais frequentes é de 310-320 graus para a direção de pico e de 11-12 s para o período de pico.

Na Tabela 7 apresentam-se os parâmetros estatísticos da agitação marítima registada pela boia ao largo. A média da altura de onda significativa indica 1.82 m ao largo. Contudo, o intervalo varia desde 0.28 m (mar calmo, praticamente sem ondas) até 8.44m.

Tabela 7 - Parâmetros estatísticos da agitação marítima registada pela boia

	Hs(m)	Tp(s)	θp(°)
Máximo	8.44	18.70	359.00
Mínimo	0.28	2.80	2.00
Média	1.82	10.96	298.77
Desvio Padrão	1.15	2.76	18.66
Variância	1.32	7.60	348.38
Mediana	1.48	11.10	303.00
Moda	1.17	10.00	310.00
Nº de pontos total	60240	60240	60240

3.5.3 Regime observado no ponto P5 obtido com modelo SWAN

Os resultados do modelo numérico SWAN para o ponto P5, que permitem caracterizar o regime observado, são apresentados nas Figuras 21 a 23, juntamente com as medições da boia, em termos de séries temporais de altura significativa, Hs, período de pico, Tp e direção de pico das ondas, θp. Desta forma, é possível analisar as alterações que a agitação sofre ao propagar-se desde a boia até à entrada do domínio do modelo DREAMS, isto é, determinar os parâmetros da agitação marítima do regime observado para o ponto P5, de coordenadas M,P (135564, 106120) no período de maio de 1988 a junho de 2012.

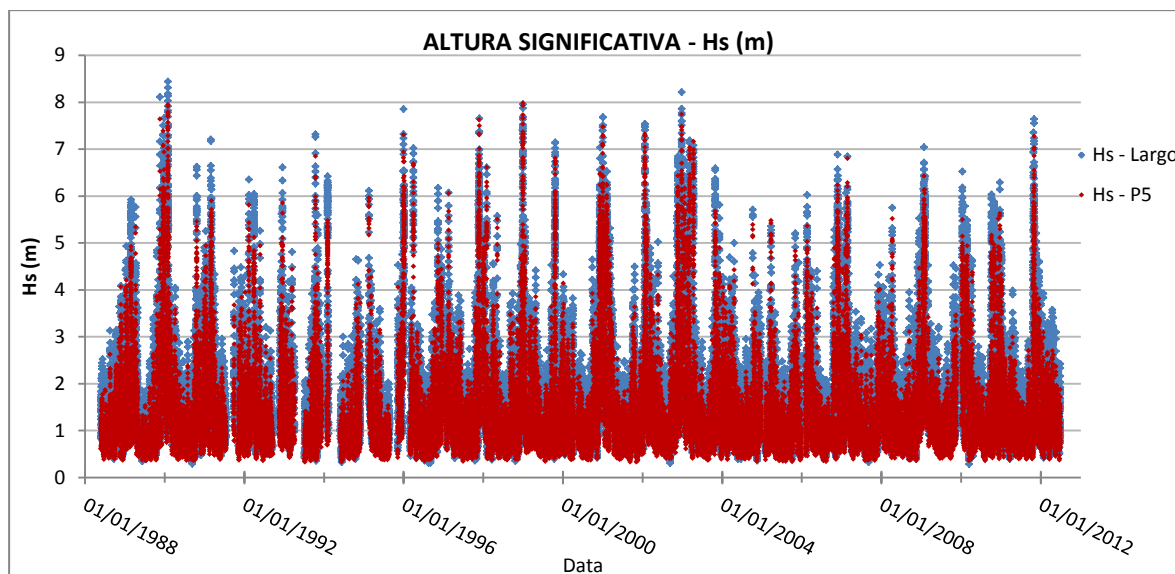


Figura 21 - Comparação da altura significativa Hs no P5 e a boia, no período entre 2005 a 2012

Em termos de resultados obtidos através do modelo SWAN no ponto P5, para Hs, o valor máximo é de 7.98 m, mínimo é de 0.33 m e médio é de 1.51 m.

Comparando os resultados de Hs medidos pela boia ondógrafo do porto de Sines e os do modelo SWAN no ponto P5, verifica-se que existe uma diferença pouco significativa, ou seja, em termos de altura de onda significativa a agitação neste ponto é muito semelhante à agitação real que se verifica na boia, isto é, as alturas não sofrem grandes alterações na sua propagação entre a boia e o ponto P5.

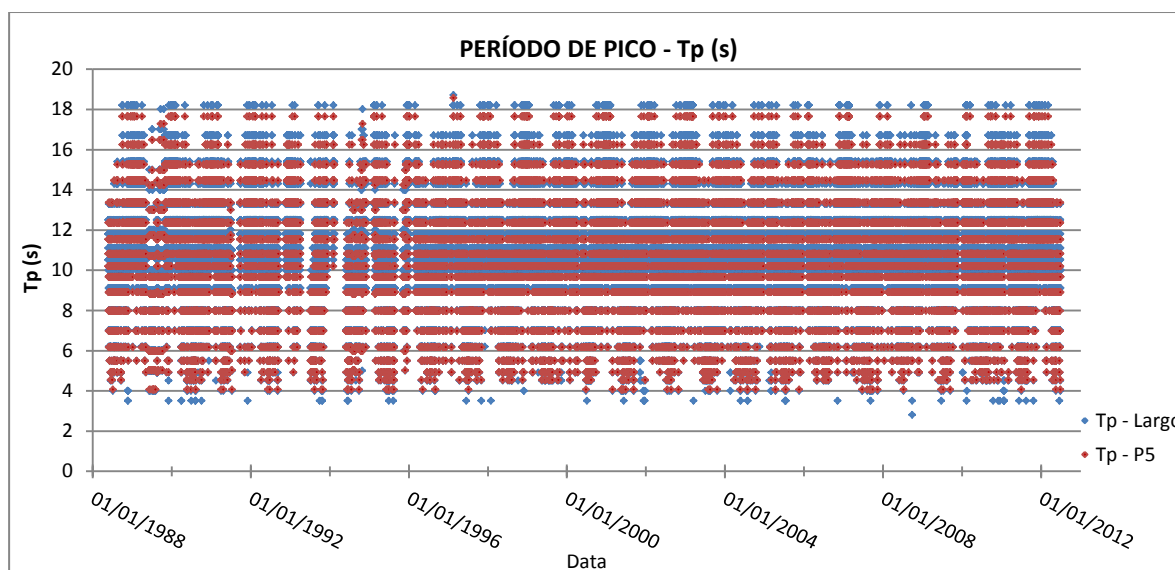


Figura 22 - Comparação do período de pico Tp no P5 e ao Largo, no período entre 1988 e 2012

Em termos de resultados de Tp obtidos através do modelo SWAN no ponto P5, o valor máximo é de 18.56 s, o mínimo de 4.05 s e o médio de 10.84 s. Comparando os resultados de Tp medidos pela boia ondógrafo do porto de Sines e os do modelo SWAN no ponto P5, verifica-se que a diferença é pouco significativa, isto é, não há alterações significativas dos períodos da onda entre a boia e o ponto P5.

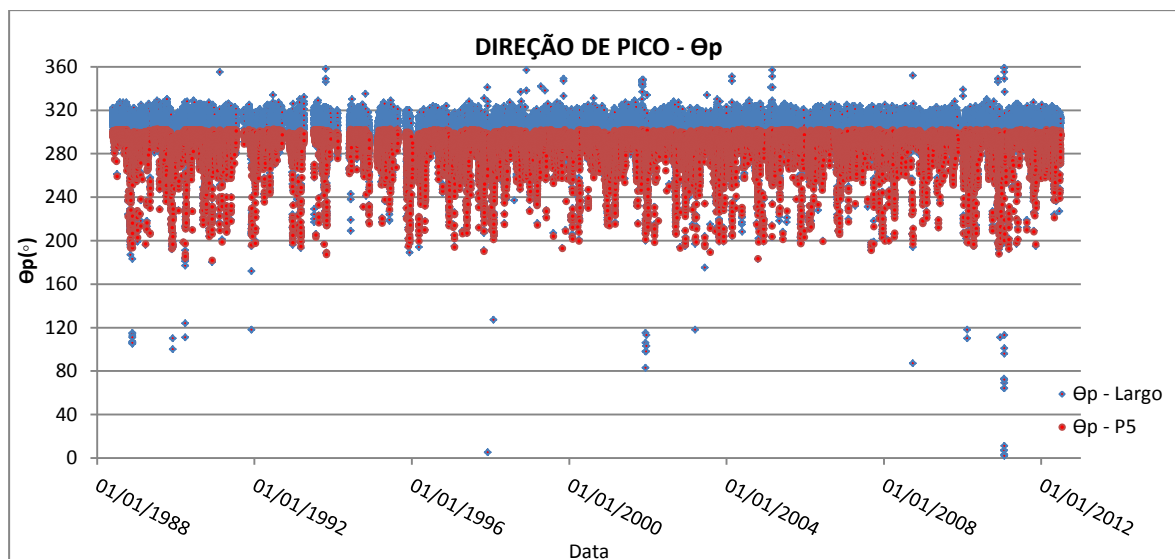


Figura 23 - Comparação da direção de pico θ_p no P5 e ao Largo, no período entre 1988 e 2012

Em termos de resultados de θ_p obtidos através do modelo SWAN no ponto P5, o valor máximo é de 302 graus, o mínimo de 181 graus e o médio de 289 graus. Comparando os resultados de θ_p medidos pela boia do porto de Sines e os do modelo SWAN no ponto P5, verifica-se que existe uma rotação das direções para se disporem perpendicularmente à batimetria, i.e., rodando para W (ver rosa das direções, Figura 24).

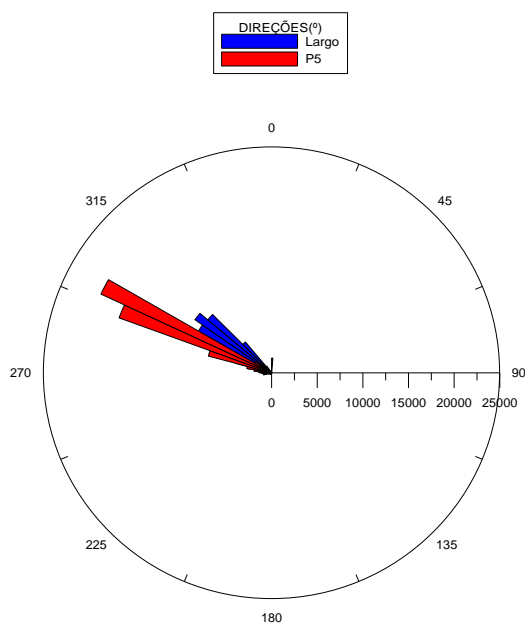


Figura 24 - Rosa das direções: Comparação da direção de pico θ_p no P5 e ao Largo

Com efeito, observando a rosa das direções, conclui-se que a direção de pico roda cerca de 10 graus desde a boia até ao ponto P5. A direção predominante na boia situa-se nos 310 graus, enquanto no ponto P5 se situa nos 300 graus.

Com os resultados obtidos com o modelo SWAN para o ponto P5, podem-se construir, tal como se fez para os dados observados na boia ondógrafo, os histogramas H_s-T_p , $H_s-\theta_p$ e $T_p-\theta_p$. O número total de dados dos histogramas no ponto P5 é de 58606 (Figura 25, Figura 26 e Figura 27).

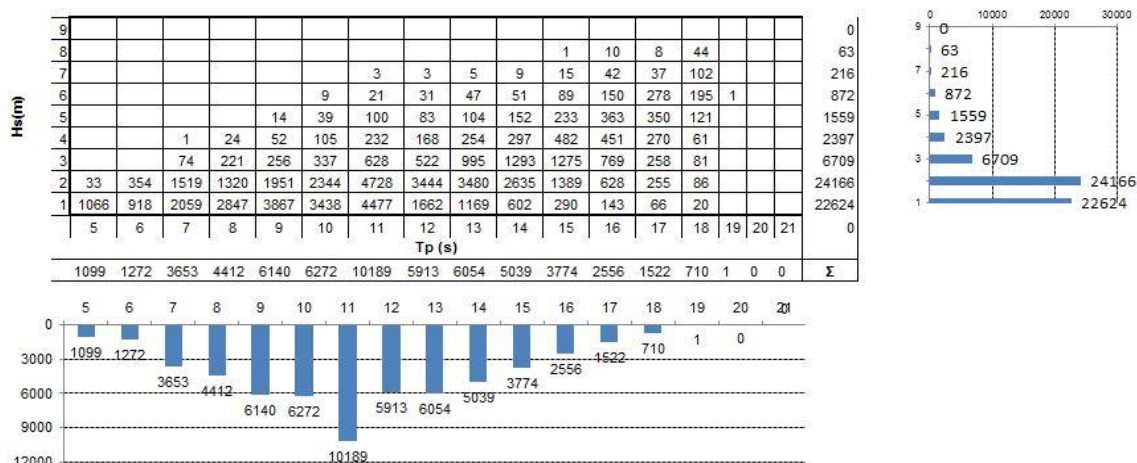


Figura 25 - Histograma geral do conjunto Hs-Tp no Ponto P5

Neste histograma geral do conjunto Hs e Tp, observa-se que a gama de valores mais frequente é entre 10 e 11 s para o período de pico e de 1-2 m para a altura significativa.

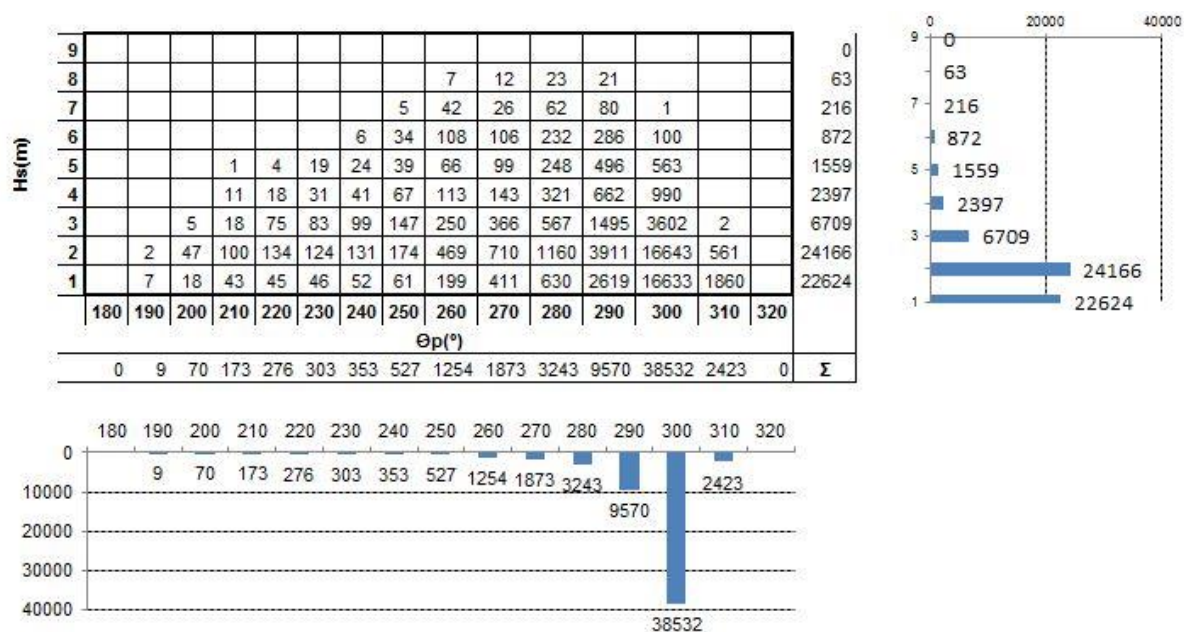


Figura 26 - Histograma geral do conjunto Hs-θp no ponto P5

No histograma geral do conjunto Hs e θp, observa-se que a gama de valores mais frequentes é de 290-300 graus para a direção de pico e de 1-2 m para a altura significativa.

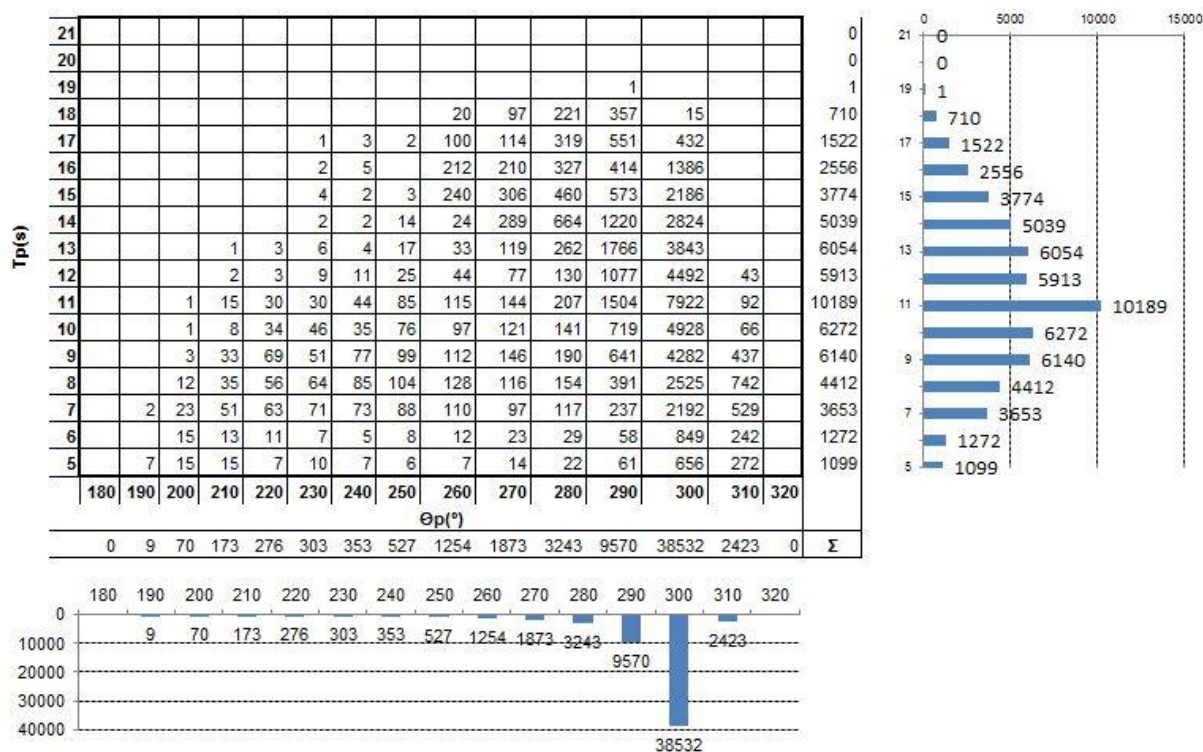


Figura 27 - Histograma geral do conjunto Tp-θp no ponto P5

No histograma geral do conjunto Tp e θp, confirma-se que a gama de valores mais frequentes é de 290-300 graus para a direção de pico e respetivamente de 10-11 s para o período de pico.

Tal como para a boia, também se obtiveram os parâmetros estatísticos da agitação marítima obtida no ponto P5 (Tabela 8).

Tabela 8 - Parâmetros Estatísticos da agitação Marítima no Ponto P5

	Hs(m)	Tp(s)	θp(°)
Máximo	7.98	18.56	302.81
Mínimo	0.33	4.05	181.80
Média	1.51	10.84	289.07
Desvio Padrão	1.06	2.73	14.28
Mediana	1.17	10.81	293.33
Moda	0.87	9.67	296.10
Nº de pontos total	58606	58606	58606

De forma a perceber melhor as diferenças na alteração da direção de propagação entre a boia e o ponto P5, realizou-se uma comparação da direção de pico registada na boia e no ponto P5. Apresenta-se na Figura 28 os resultados da comparação das direções separadamente para os períodos de pico menores que 10 s, entre 10 s e 15 s e maiores que 15 s.

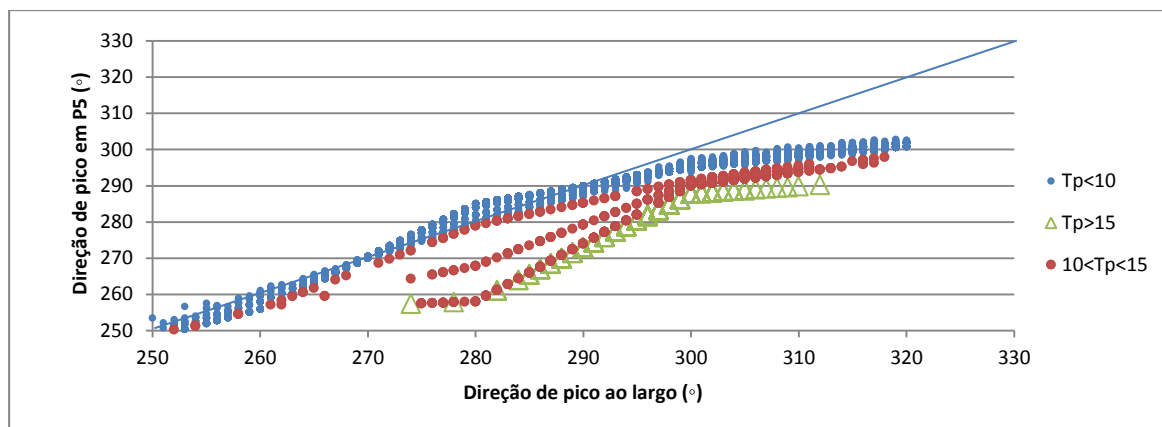


Figura 28 - Comparação das direções de pico registada na boia e ponto P5 separadamente para os períodos de pico menores que 10 s, entre 10 s e 15 s e maiores que 15 s

Da análise desta figura, verifica-se que o período de pico influencia claramente a alteração da direção de pico desde a boia até ao ponto P5. Para $T_p < 10$ s e para uma direção na boia até aproximadamente 300° , a direção da onda praticamente não se altera ao propagar-se desde a boia até ao ponto P5. Para valores superiores a 300° , observa-se uma rotação da direção que aumenta com o aumento da direção na boia. Já para $T_p > 15$ s, a alteração é bastante visível para todos os valores de direção na boia observados, verificando-se uma redução do valor da direção, mais clara para direções superiores a 300° . Para períodos de pico entre 10 s e 15 s o comportamento é intermédio entre os dois descritos.

4 CARACTERIZAÇÃO DA AGITAÇÃO MARÍTIMA COM O MODELO DREAMS

4.1 Introdução

Neste capítulo efetua-se, primeiramente, a descrição do modelo DREAMS, das condições de aplicação do modelo e uma análise do desempenho do modelo (em termos de ondas de curtas ($5 \text{ s} < T < 50 \text{ s}$), através de uma comparação dos resultados obtidos por este e pelos dados das medições realizadas pelo marégrafo localizado no interior do Terminal XXI no período de 1 a 4 de Novembro de 2011.

Seguidamente, é efetuada a caracterização do regime de agitação marítima (de curto período) no interior da bacia portuária no período entre Maio de 1988 e Junho de 2012. Para tal utilizou-se o regime de agitação marítima estabelecido no capítulo anterior com o modelo SWAN, à entrada do Terminal XXI, e transferiu-se, com o modelo DREAMS, essas características de agitação marítima para o seu interior, mais concretamente para um ponto em frente ao cais do terminal.

Finalmente, é apresentada uma análise dos resultados do modelo no que se refere a ondas longas ($T > 50 \text{ s}$) com o objetivo de estudar a ressonância no interior da bacia portuária do Terminal XXI do porto de Sines. Nesse sentido, efetuaram-se cálculos sistemáticos com o modelo DREMS para uma gama de períodos e direções de onda longa incidente.

4.2 Descrição do modelo

DREAMS é um modelo numérico de elementos finitos para o cálculo da propagação e deformação de ondas marítimas em zonas costeiras, Fortes (1993). Este modelo baseia-se na equação elíptica de declive suave, BERKHOFF (1972), a qual descreve os efeitos combinados da refração, da difração e da reflexão de ondas lineares harmónicas propagando-se em fundos de inclinação suave, como os que ocorrem em portos, baías e zonas costeiras.

A equação elíptica de declive suave (*mild-slope*) resulta da integração vertical das equações de continuidade e de quantidade de movimento para escoamentos irrotacionais e gravíticos de fluidos ideais (fluido homogéneo, incompressível e não viscoso), considerando a teoria das ondas de pequena amplitude e admitindo que o fundo é de declive suave (até 1:3). Torna-se, assim, possível obter a seguinte expressão da equação linear de *mild-slope*, ou de declive suave, independente de tempo:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \Phi) + k^2 CC_g \Phi = 0 \quad (8)$$

sendo Φ o potencial de velocidades, independente da coordenada vertical z e da variável tempo, t , que se relaciona com Φ através de:

$$\Phi(x, y, z, t) = \phi(x, y) \cdot \frac{\cosh k(h + z)}{\cosh kh} e^{-i\omega t} \quad (9)$$

C é a velocidade de fase ou celeridade de fase da onda:

$$C = \frac{\omega}{k} = \sqrt{\frac{g}{k} \tanh(kh)} \quad (10)$$

C_g é a velocidade de grupo:

$$C_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{1}{2} C \left[1 + \frac{2kh}{\sinh(2kh)} \right] \quad (11)$$

ω é a frequência angular obtida através da relação de dispersão para ondas de pequena amplitude (teoria linear):

$$\omega^2 = gk \tanh(kh) \quad (12)$$

Esta equação pode também ser expressa em termos de elevação de superfície livre, η , que se relaciona com ϕ através de:

$$\eta = \text{Re} \left[\frac{i\omega}{g} \left(\phi(x, y) \cdot \frac{\cosh k(h+z)}{\cosh(kh)} \right) e^{-i\omega t} \right], z = 0 \quad (13)$$

A introdução de η , dado pela equação (13), na equação (10) conduz a:

$$\nabla \cdot (CC_g \nabla \eta) + k^2 CC_g \eta = 0 \quad (14)$$

A possibilidade de descrever fenómenos complexos pela sobreposição de efeitos mais simples é uma das consequências importantes da utilização da teoria linear.

O modelo DREAMS, Fortes (1993, 2002), resolve a equação de declive suave utilizando o método de elementos finitos, discretizando o domínio em estudo com uma malha de elementos triangulares. Neste domínio, as condições de fronteira implementadas são: a condição de radiação, que permite a saída das ondas geradas no domínio; condição de geração e radiação combinadas, que simula a entrada e saída de ondas numa fronteira do domínio, por exemplo, nas fronteiras abertas; a condição de reflexão (total ou parcial), que simula fronteiras como praias, falésias, molhes ou obras acostáveis.

O modelo DREAMS requer como dados de entrada as características da agitação incidente (período, direção da onda e nível de maré), bem como da malha de elementos finitos em que foi discretizado o domínio em estudo e a fronteira desse domínio. Os resultados do modelo DREAMS são os valores do índice de agitação (H/H_0), relação entre a altura de onda no ponto do domínio de cálculo, H , e a altura de onda à entrada do domínio de cálculo, H_0 , ou coeficientes de amplificação (utilizados frequentemente em estudos de ressonância portuária), as direções de propagação da onda e ainda o campo de velocidades horizontais na superfície livre e as linhas representativas das cristas das ondas (linhas de igual fase).

O modelo DREAMS é uma ferramenta, a nível de modelação numérica de propagação e dissipação de ondas em zonas portuárias e abrigadas, com resultados bastante satisfatórios em todas as aplicações realizadas até ao momento (Fortes *et al.*, 1997 e 2009). Uma das vantagens do modelo é o facto de as malhas de elementos finitos serem completamente independentes da direção de onda, ou seja, a qualidade dos resultados não vem afetada pela posição da malha relativamente à posição de onda.

Como limitações do modelo evidenciam-se o facto de o modelo não ter em conta os efeitos da dissipação de energia por rebentação e atrito de fundo, os efeitos das correntes na propagação das ondas ou os galgamentos sobre estruturas portuárias; o modelo é linear, pelo que não tem em conta efeitos não-lineares, como por exemplo, a interação de ondas e correntes, a interação de ondas devido a topografia do fundo, a transferência de energia entre componentes de onda e a geração de componentes de baixa frequência induzidas por grupos de ondas curtas. O modelo efetua a propagação

de ondas regulares e unidirecionais, não tendo por isso em conta, os efeitos de dispersão em frequência e em direção, presentes na agitação real. Na propagação de ondas marítimas de curto período, a aplicação do modelo está limitada a zonas relativamente pequenas, devido ao elevado esforço computacional exigido pelo modelo.

4.3 Condições de Aplicação

4.3.1 Batimetria, Domínio de cálculo e malha de elementos finitos:

Para executar o modelo DREAMS é necessário introduzir diferentes dados de base tais como: as características do domínio de cálculo e a malha de elementos finitos, as condições de fronteira, os coeficientes de reflexão e as condições de agitação incidente.

O domínio de cálculo foi definido com base em elementos fornecidos pelo LNEC, Fortes *et al.*, 2012 e Neves *et al.* 2013, e corresponde à Configuração 1C (Figura 29). Esta configuração corresponde a uma solução intermédia entre a configuração 1A (configuração inicial do terminal, antes de janeiro de 2011, Capitão *et al.*, 2013) e 1B (configuração após as obras de expansão do mesmo, finalizadas em 2012). Esta configuração apresenta um comprimento do quebra-mar Leste de 1100 m e do cais de acostagem para dois postos com 730 m, Figura 30.

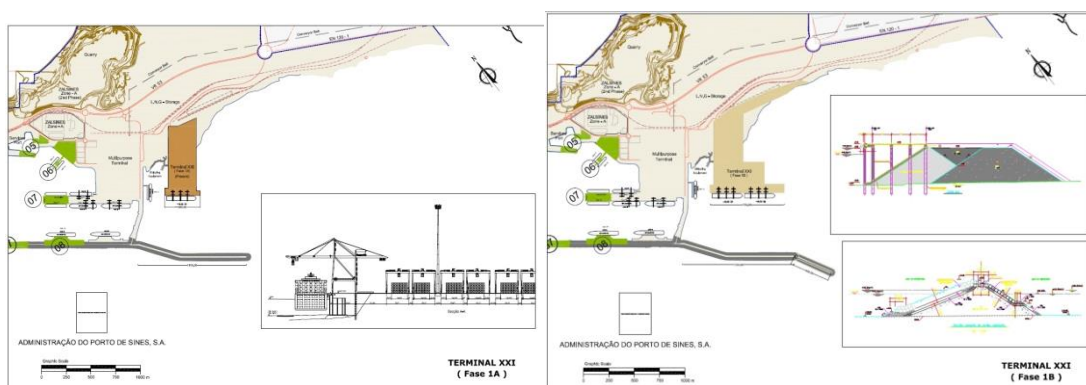


Figura 29 - Configuração do Terminal XXI: Configuração 1 A (Fevereiro de 2011) e Configuração 1B (Dezembro de 2012) (APS).

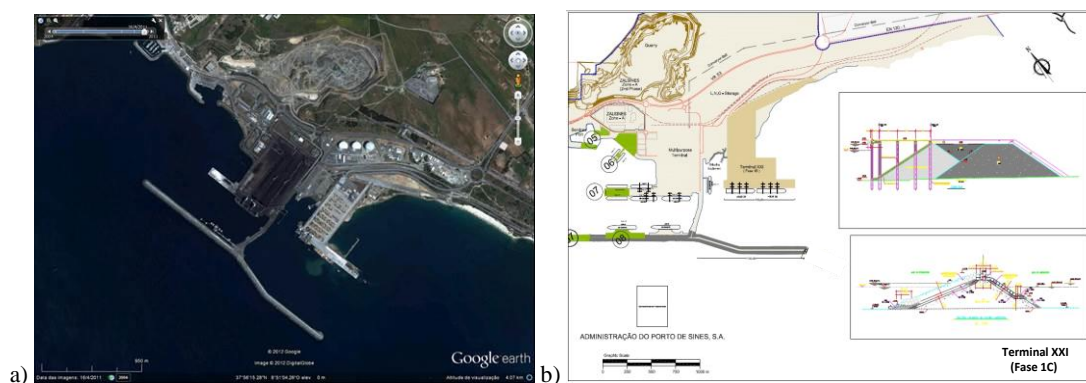


Figura 30 - Configuração do Terminal XXI, em maio de 2011. Imagem (Google Earth©) e desenho da configuração (APS).

O domínio de cálculo foi discretizado por uma malha de elementos finitos com 339 452 elementos triangulares e 170 843 nós e foram definidos 5 pontos junto ao Terminal XXI para obtenção de resultados (Figura 32). Esta malha é mais ou menos refinada consoante a profundidade no local de

cada elemento. Deste modo, a malha foi definida de forma a garantir uma média de 10 pontos por comprimento de onda para um período de 8 s. Note-se que quanto maior é o período maior o comprimento de onda.

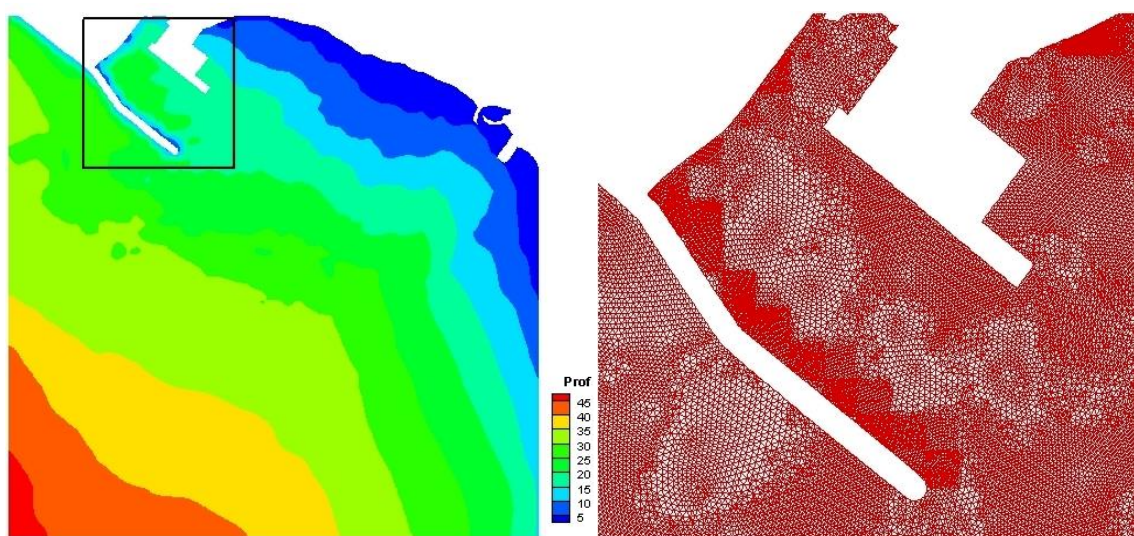


Figura 31 - Batimetria e malha de elementos finitos na zona interior do Terminal XXI

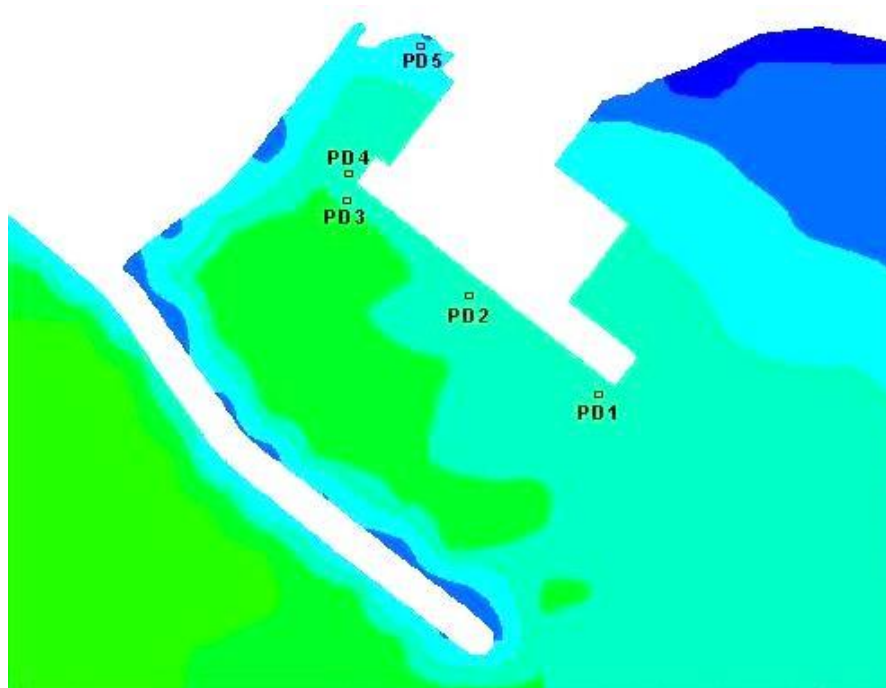


Figura 32 - Localização dos pontos para obtenção dos resultados do modelo DREAMS

4.4 Ondas curtas

4.4.1 Introdução

O modelo DREAMS foi aplicado na simulação da propagação de ondas de curto período, ou seja, ondas regulares com períodos inferiores a 50 s, para avaliação da capacidade do modelo em simular convenientemente a propagação das ondas desde a entrada do Terminal XXI até ao seu interior, bem como para o estabelecimento do regime da agitação marítima no interior da bacia portuária do Terminal XXI do porto de Sines entre Maio de 1988 e Junho de 2012.

Mais concretamente, o modelo foi primeiramente aplicado para as condições de agitação marítima à entrada do Terminal nos dias 1 a 4 de Novembro de 2011 e os seus resultados foram comparados com os dados (componente de ondas curtas) do marégrafo instalado no Terminal XXI. No segundo caso, o modelo DREAMS foi utilizado para transferir o regime de agitação marítima à entrada do porto, desde Maio de 1988 até Junho de 2012, para o seu interior, e mais concretamente, para a localização do marégrafo. Com base nessa transferência foi definido o regime de agitação marítima no interior do terminal, i.e., em frente ao cais do terminal. Note-se que em ambos os casos, as características de agitação marítima incidente do modelo DREAMS proveem dos resultados do modelo SWAN à entrada do Terminal XXI, i.e., no ponto PD5.

Em qualquer das duas aplicações, efetuaram-se os seguintes procedimentos:

- Definição das condições de fronteira e, em particular, das condições de reflexão de cada um dos troços que definem as fronteiras do domínio de cálculo do modelo;
- Definição das condições de agitação incidente;
- Cálculos com o modelo DREAMS.

4.4.2 Condições de fronteira

Para se poderem estabelecer os coeficientes de reflexão a impor ao longo da fronteira (Figura 33) do domínio de cálculo, é necessário dividir essa fronteira em diferentes troços que representam as fronteiras reais (Fortes *et al.*, 2012). As condições de fronteira de entrada e saída da agitação foram impostas nos troços A1 a A3, sendo que os troços A1 e A2 foram considerados de geração-irradiação, e o troço A3 de irradiação. Nos restantes troços foram estabelecidas condições de fronteira com reflexão parcial.

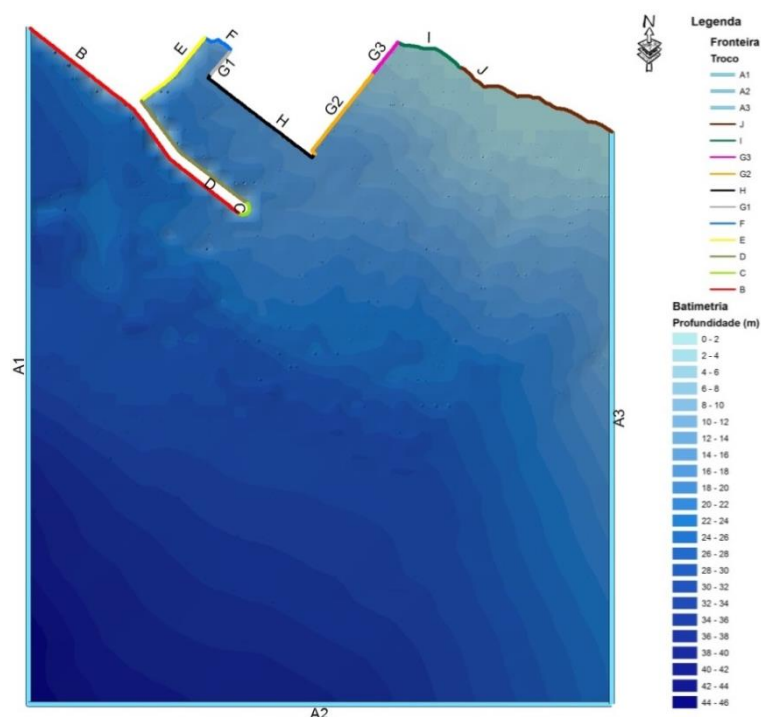


Figura 33 - Troços de fronteiras e batimetria da bacia portuária do Terminal XXI do Porto de Sines.

Os valores dos coeficientes de reflexão, a atribuir aos troços com reflexão parcial, foram determinados com base nas características de cada troço, tais como porosidade, diâmetro do material, declive do talude e profundidade no pé do talude e ainda, as características da onda (altura e comprimento), através do procedimento descrito em Seeling e Ahrens (1995).

As características dos troços da fronteira, Tabela 9, foram definidas com base em fotografias obtidas no local pelo LNEC.

Tabela 9 - Terminal de Contentores. Características dos troços da fronteira da bacia portuária.

Troço	Características
J	Praia com rocha: declive 1:5
I	Praia: declive 1:10
G3	Proteção marginal Tipo I: enrocamento com peso entre 200-500 Kgf; profundidade média utilizada: 7.0 m (4-10 m)
G2	Proteção marginal Tipo I: enrocamento com peso entre 200-500 Kgf; profundidade média utilizada: 14.0 m (10-18 m)
H	Parede Vertical
G1	Proteção marginal Tipo I: enrocamento com peso entre 10-50 Kgf; profundidade média utilizada: 15.0 m (11.5-18.5 m)
F	Praia: declive 1:12.5
E	Enrocamento com peso entre 100-300 Kgf, declive 1:1.5
D	Talude interior do Molhe Leste
C	Cabeça do Molhe Leste
B	Talude exterior do Molhe Leste

Na Tabela 10, apresentam-se os valores dos coeficientes de reflexão utilizados nos cálculos, para cada configuração da bacia portuária e para as condições de agitação admitidas.

Tabela 10 - Valores dos coeficientes de reflexão nos troços da fronteira dos domínios de cálculo.

T (s)	Troço										
	B	C	D	E	F	G1	H	G2	G3	I	J
8	0.37	0.37	0.62	0.36	0.10	0.35	0.90	0.38	0.46	0.15	0.25
10	0.45	0.45	0.69	0.48	0.15	0.48	0.90	0.50	0.57	0.22	0.32
12	0.51	0.51	0.75	0.58	0.21	0.57	0.90	0.60	0.66	0.29	0.37
14	0.57	0.56	0.78	0.65	0.26	0.65	0.90	0.67	0.72	0.36	0.69
20	0.38	0.37	0.40	0.63	0.30	0.78	0.90	0.51	0.74	0.40	0.50

4.4.3 Análise do desempenho do modelo DREAMS

Para a análise do desempenho do modelo DREAMS e considerando as condições de agitação marítima à entrada do terminal no dia 1 a 4 de Novembro de 2011, i.e., no ponto P5, efetuaram-se cálculos

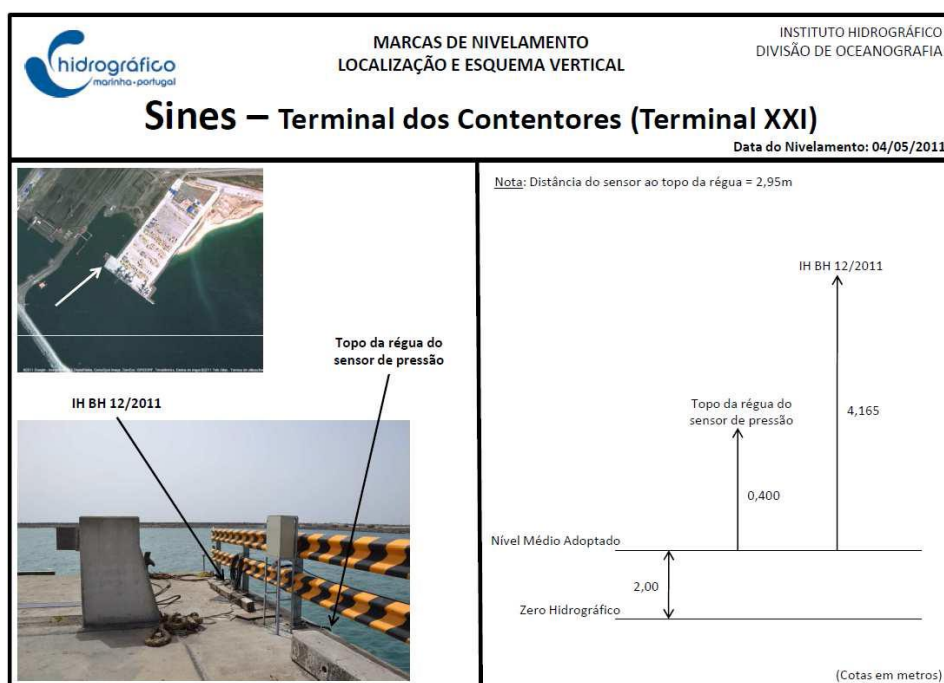
numéricos com o modelo DREAMS e obtiveram-se os resultados no ponto PD4 (posição do marégrafo), Figura 32, os quais foram comparados com dados do marégrafo.

Esta comparação foi efetuada em termos dos parâmetros altura significativa e período de pico, recorrendo às diferenças entre valores numéricos e medidos (valores máximo, mínimo e médio das diferenças) e aos parâmetros estatísticos RMSE, BIAS e IC.

Dados fornecidos pelo marégrafo

No interior da bacia portuária do Terminal XXI do porto de Sines foram realizadas medições com um marégrafo, localizado no ponto P4, dispondo-se de dados de agitação marítima de 1 a 4 de Novembro de 2011, Neves *et al.*, 2013.

O marégrafo, operado pelo Instituto Hidrográfico (IH), é composto por um sensor de pressão hidrostática acoplado a um registador (*datalogger*), que regista o nível da água a cada 1 segundo. Este marégrafo recolhe dados desde final de março de 2011 e existem registos válidos a partir de 8 de abril de 2011.



Os dados recolhidos foram tratados e processados pelo Instituto Hidrográfico e separados nas seguintes componentes de ondas:

- Componentes de agitação marítima (períodos das ondas até 32 s);
- Componentes de ondas longas (períodos entre 32 s e 8192 s – 2 h e 18 m);
- Componente de maré (períodos superiores a 8192 s).

Entre 1 a 4 de Novembro de 2011, registou-se a ocorrência de temporais (associados a registos com $H_s > 5$ m) nos dias 3 e 4.

Cálculos com o modelo DREAMS

Para as características das ondas (H_s , T_p e θ_p) à entrada do Terminal XXI, calculadas pelo modelo SWAN nos dias 1 a 4 de Novembro, efetuaram-se cálculos com o modelo DREAMS e obtiveram-se os valores de altura de onda significativa e período de pico e na localização do marégrafo.

Na Figura 35 e Figura 36, apresentam-se as séries temporais dos resultados obtidos pelo modelo DREAMS e dos dados recolhidos pelo marégrafo, correspondentes aos parâmetros H_s e T_p , respetivamente.

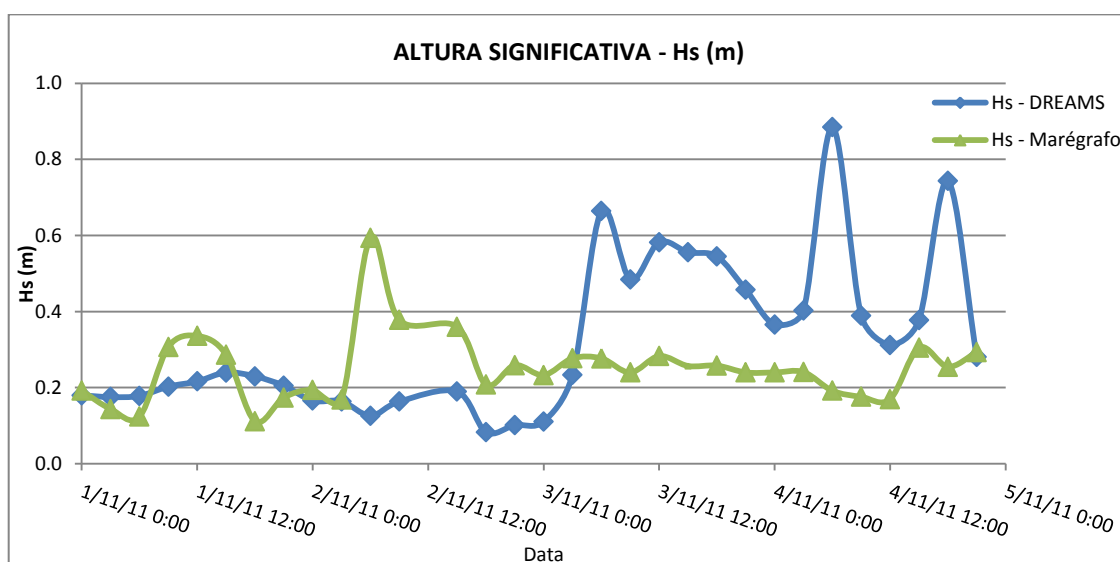


Figura 35 - Comparação da altura significativa H_s no modelo DREAMS e Marégrafo

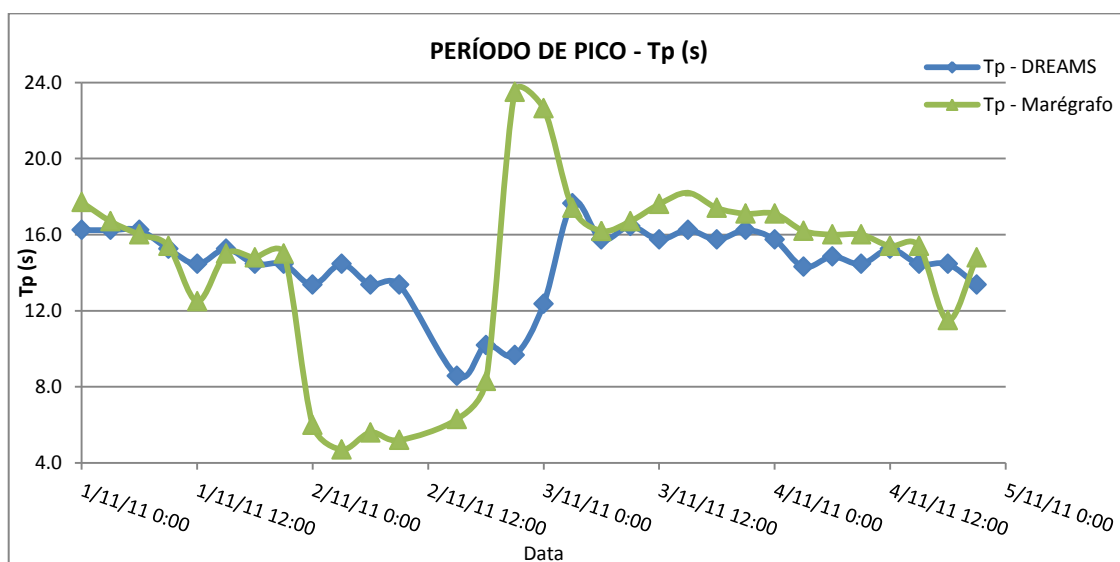


Figura 36 - Comparação do período de pico T_p no modelo DREAMS e Marégrafo

Da análise dos gráficos de comparação entre os dados medidos pelo marégrafo e os resultados do modelo DREAMS, verifica-se que os resultados do modelo, em termos de altura significativa, H_s , seguem a agitação real medida pelo marégrafo, excetuando o período medido entre o dia 3 de Novembro de 2011 e as 12h seguintes, que apresentou uma diferença significativa em termos de alturas. Em relação ao período de pico, T_p , nota-se que a maior diferença entre os valores do período medido pelo marégrafo e o obtido no modelo numérico ocorre durante o dia 2 de Novembro,

Para avaliar melhor as diferenças entre os resultados do modelo e os dados medidos pelo marégrafo, efetuou-se uma breve análise estatística às diferenças da altura significativa, Hs, e do período de pico, Tp, em termos de valores mínimos, máximos, média e desvio padrão (Tabela 11).

Tabela 11 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo DREAMS e as medições do marégrafo

Diferença	Hs(m)	Tp(s)
Máximo	0.69	13.83
Mínimo	0.00	0.15
Média	0.18	2.76
Desvio Padrão	0.16	3.58
Total	31.00	31.00

Calcularam-se também quatro parâmetros estatísticos: o viés (BIAS), a raiz do erro médio quadrático (RMSE), o índice de concordância (IC) e o índice de dispersão (SI). Na Tabela 5 apresentam-se os resultados destes parâmetros.

Tabela 12 - Análise das diferenças entre os resultados do modelo SWAN e as medições do ADCP

	Hs(m)	Tp(s)
BIAS	0.07	0.01
RMSE	0.24	4.54
IC	0.22	0.21
SI	0.95	0.31

Os resultados do modelo numérico apresentam uma melhor concordância com os valores medidos em termos de altura de onda significativa, Hs, traduzidos por um valor de IC de 0.22 e um valor de RMSE baixo (0.24). Verifica-se que o modelo sobrestima os valores medidos (BIAS=0.07). Em relação à direção de pico, Tp, os valores de IC são menores face aos verificados para o parâmetro Hs enquanto que os valores de RMSE são significativamente maiores. O modelo sobrestima os valores medidos para o período de pico. Em relação ao SI verifica-se, em termos de altura de onda e período de pico, uma boa aproximação.

Contudo, estes dados são meramente indicativos do erro cometido, uma vez que não foi efetuada qualquer calibração do modelo DREAMS.

4.4.4 Regime de agitação no interior do Terminal XXI de 1988 a 2012

Uma vez conhecido o regime de agitação marítima à entrada do Terminal XXI, ver secção 3.5, procedeu-se, com o modelo DREAMS, à transferência desse regime para o interior do terminal e, mais concretamente, para o meio do cais do terminal, definindo deste modo o regime de agitação marítima de curto período no interior do Terminal XXI.

A metodologia utilizada foi a mesma que a efetuada com o modelo SWAN, recorrendo ao estabelecimento de matrizes de transferência.

4.4.5 Condições de agitação incidente

As características de agitação incidentes correspondem às obtidas no ponto P5 com o modelo SWAN, no período de Maio de 1988 a Junho de 2012. Na Tabela 13 estão representadas as características da agitação na entrada do domínio do modelo DREAMS.

Tabela 13 - Dados de agitação na entrada do domínio do modelo DREAMS

	Hs(m)	Tp(s)	$\theta_p(^{\circ})$
Máximo	7.98	18.56	302.81
Mínimo	0.33	4.05	181.80

Para a transferência dessas características e dado o seu elevado número (58606), decidiu-se também recorrer a matrizes de transferências, tal como efetuado com SWAN.

Assim, definiram-se as gamas de valores os parâmetros Hs, Tp, e θ_p , bem como intervalos para a realização dos cálculos numéricos.

Para a definição dessas gamas e intervalos a simular, teve-se em consideração os valores mínimos e máximos de cada parâmetro obtidos pelo SWAN (Tabela 14), de forma a abranger os períodos e direções mais relevantes da agitação marítima possíveis de penetrar no porto e ainda a consideração do tempo necessário para correr o modelo. De notar que no modelo DREAMS devido ao facto de ser um modelo linear, todos os cálculos são efetuados para um único valor de altura de onda igual a 1 m.

Tabela 14 - Dados de agitação na entrada do domínio do modelo DREAMS

	Hs(m)	Tp(s)	$\theta_p(^{\circ})$
Máximo	1	20	320
Mínimo	1	8	180
Intervalo	1	2	22.5

Obtiveram-se resultados do modelo DREAMS para todas as combinações de direções e períodos da Tabela 14, para o nível de maré de +2.0 m ZH. Os resultados constituem a matriz de transferência.

Os resultados do modelo numérico DREAMS para o ponto PD2, a meio do cais do terminal, que permitem caracterizar o regime de agitação no interior do Terminal XXI, no período entre Maio de 1988 e Junho de 2012, são apresentados na Figura 37 e Figura 38, em termos de séries temporais de altura significativa Hs e período de pico Tp.

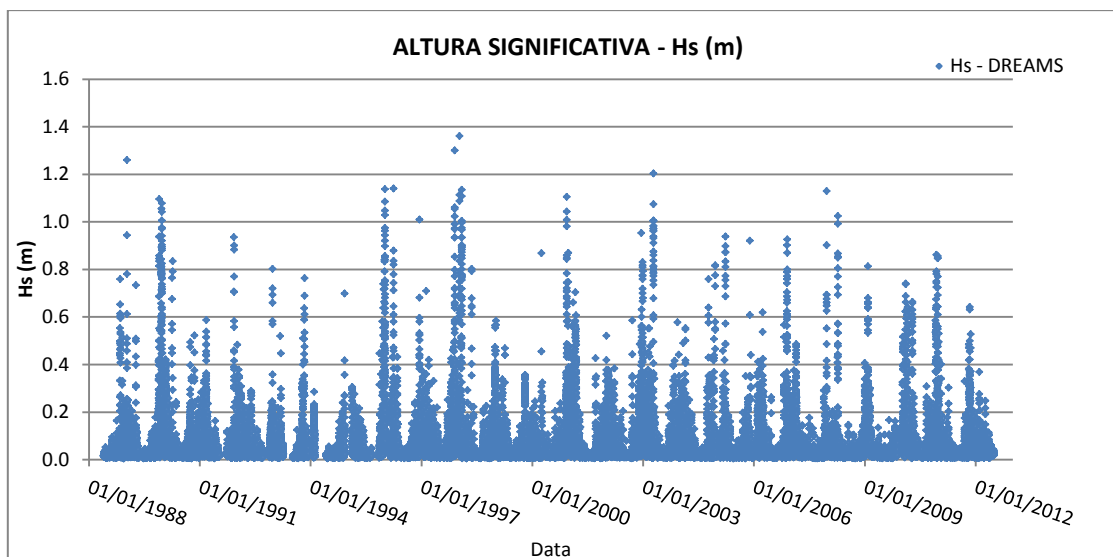


Figura 37 - Altura significativa Hs no Terminal XXI, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012

Em termos de valores de Hs no Terminal XXI, neste período observou-se um valor máximo de 1.36 m, um mínimo de 0.001 m e valores médios de 0.06 m. Relativamente às condições na entrada do terminal, verifica-se uma redução significativa do valor máximo, que passou de 7.98 m para 1.36 m.

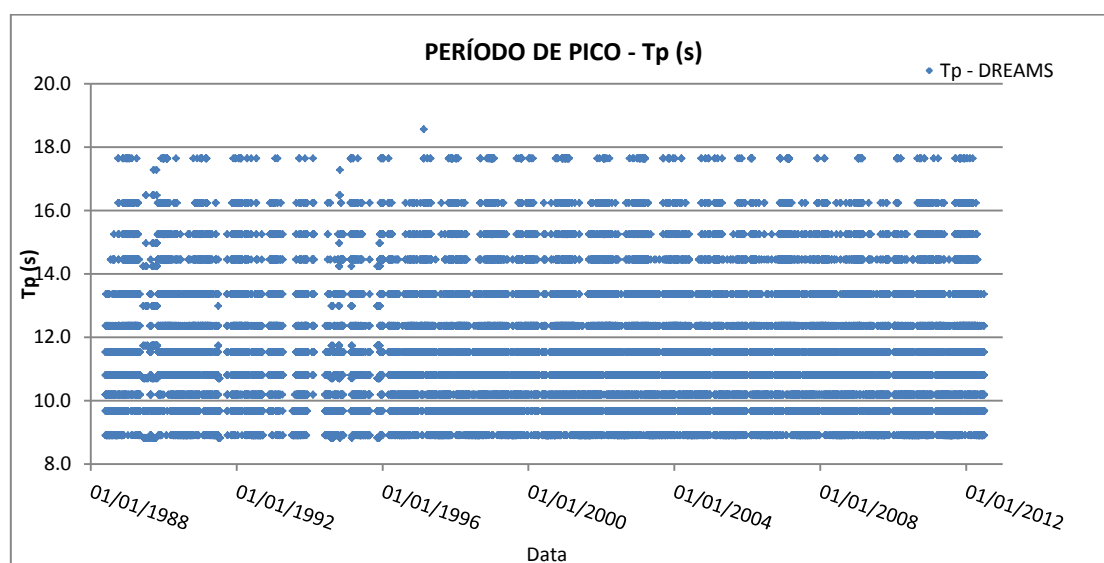


Figura 38 - Período de pico Tp no Terminal XXI, no período entre Maio de 1988 a Junho de 2012

Em termos de valores de Tp no Terminal XXI, neste período observou-se um valor máximo de 18.56 s, um mínimo de 8.82 s e valores médios de 11.70 s. Relativamente às condições na entrada do terminal, não se verificou qualquer alteração do valor máximo e mínimo do período, como seria de esperar.

Os resultados permitem concluir que as obras de proteção do Terminal são eficazes na proteção da bacia portuária, levando a uma forte redução das alturas de onda desde o largo até ao interior da bacia.

Na Tabela 15 obtiveram-se os parâmetros estatísticos da agitação marítima no interior do Terminal XXI (ponto PD2).

Tabela 15 - Parâmetros estatísticos da agitação marítima no interior do Terminal XXI

	Hs(m)	Tp(s)	$\theta_p(^{\circ})$
Máximo	1.36	18.56	216.47
Mínimo	0.00	8.82	74.73
Média	0.06	11.70	114.73
Desvio Padrão	0.10	2.15	33.20
Variância	0.01	4.63	1102.22
Mediana	0.03	11.53	100.71
Moda	0.02	9.67	99.69
Total	48157.00	48157.00	48157.00

A média da altura de onda significativa indica 0.06 m. Contudo, o intervalo varia entre 0.01 m e 1.36 m, sendo este um valor bastante alto para uma zona de atracagem de navios.

4.5 Ondas Longas

4.5.1 Introdução

As ondas de longo período são frequentemente responsáveis por agitação significativa no interior dos portos, o que pode provocar danos nas estruturas portuárias e induzir movimentos excessivos nos navios amarrados.

Nos últimos anos, têm sido realizados no LNEC diversos estudos de previsão e modelação numérica de ondas de modo a contribuir para a compreensão das origens dos fenómenos de ressonância na zona da bacia portuária do Terminal XXI do porto de Sines. As bacias portuárias, podem entrar em ressonância sob o efeito de ondas de longo período presentes no estado de agitação exterior, fenómenos de ressonância ocorrem quando o período de agitação incidente se aproxima do período próprio da bacia portuária.

O modelo DREAMS foi aplicado na análise da ressonância no interior da bacia portuária do Terminal XXI do Porto de Sines. Mais concretamente, para um conjunto de períodos de direções de onda longa incidentes estabelecidas com base na análise dos dados medidos no marégrafo desde 8 de abril de 2011, Neves *et al.*, 2013, efetuaram-se cálculos com o modelo DREAMS e determinam-se as curvas de resposta em vários pontos do domínio de cálculo, i.e., pontos 1 a 5, Figura 32.

4.5.2 Condições de reflexão

O coeficiente de reflexão adotado em todos os troços constituintes das fronteiras do domínio foi igual a 1.0, uma vez que, para gamas de períodos elevados (ondas longas), as fronteiras se comportam como superfícies completamente refletoras.

4.5.3 Condições de agitação

As características de agitação incidente correspondem a condições de agitação de ondas regulares com períodos de onda entre 140 s e 240 s e entre 540 s e 720 s, com intervalos de 20 s, e um nível de maré de +2.0 m ZH (nível médio). Em geral, ocorrem situações de ressonância, considerando o nível de maré de +2.0 m ZH, para quatro gamas de períodos (de 140 a 160 s, de 240-260 s, de 340 a 420 s e maiores que 600 s), dependendo das condições de direção da agitação (Capitão *et al.*, 2013^b).

Com base nos resultados obtidos pelo modelo SWAN no ponto P5 e analisando os valores mínimos e máximos, decidiu-se limitar as gamas de direções a simular de forma a abranger as mais relevantes da agitação marítima possível de penetrar na bacia portuária. Sendo assim, as direções de onda à entrada do domínio de cálculo são de S (180°), SSW (202.5), SW (225°), WSW (247.5°) e W (270°).

Evidencia-se ainda o facto de o modelo DREAMS ser um modelo linear, implicando que todos os cálculos são efetuados para um único valor de altura de onda, igual a 1 m. Na Tabela 16 estão representados os valores adotados para a agitação incidente no modelo.

Tabela 16 - Dados de agitação na entrada do domínio do modelo DREAMS

	Início	Fim	Passo
Hs(m)	1.00	1.00	1.00
	140.00	240.00	20.00
T(s)	540.00	720.00	20.00
$\theta(^{\circ})$	180.00	270.00	22.50

Por fim, combinando todas as direções e períodos, obtiveram-se todos os casos a simular para o nível de maré de +2.0 m ZH.

4.5.4 Resultados

Para as condições de agitação apresentadas anteriormente, efetuaram-se os cálculos com o modelo DREAMS. Os resultados do modelo consistiram nos diagramas do coeficiente de amplificação em todo o domínio de cálculo e nos 5 pontos no interior da bacia portuária, Figura 32.

Com base nos resultados do modelo DREAMS nos 5 pontos, foram construídas as curvas de resposta, H/H_0 , que traduzem a variação do coeficiente de amplificação com o período de oscilação, para as várias direções de onda incidente e nível médio de +2.0 m ZH. Na Figura 39 e Figura 40 apresentam-se as curvas de resposta para o ponto PD1, para o nível de maré de 2.0 m ZH e para os períodos de 140 s a 240 s e de 540 s a 720 s, respetivamente.

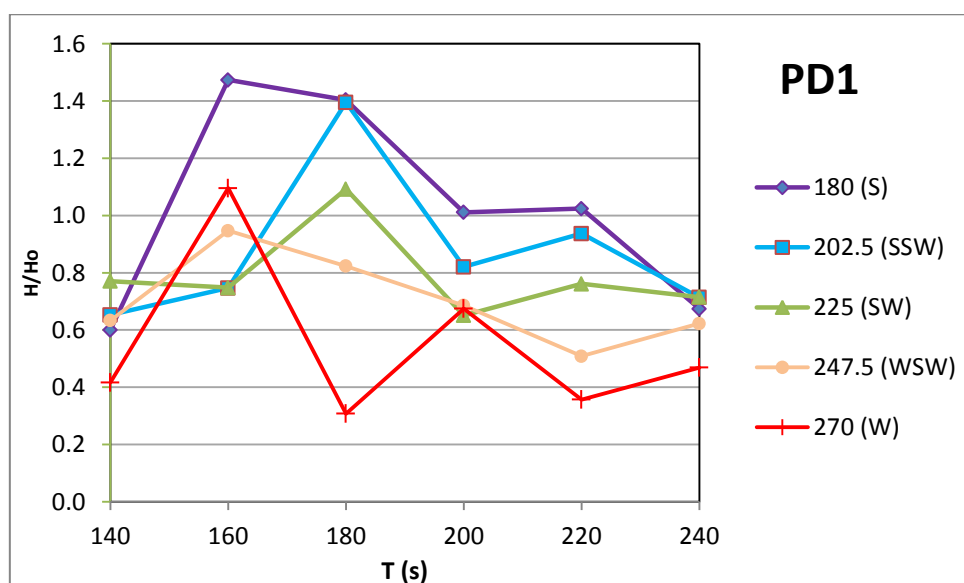


Figura 39 - Curvas de resposta para o ponto PD1, nível de maré de 2.0 m ZH, período de 140 s a 240 s e direção entre 180° (S) e 270° (W)

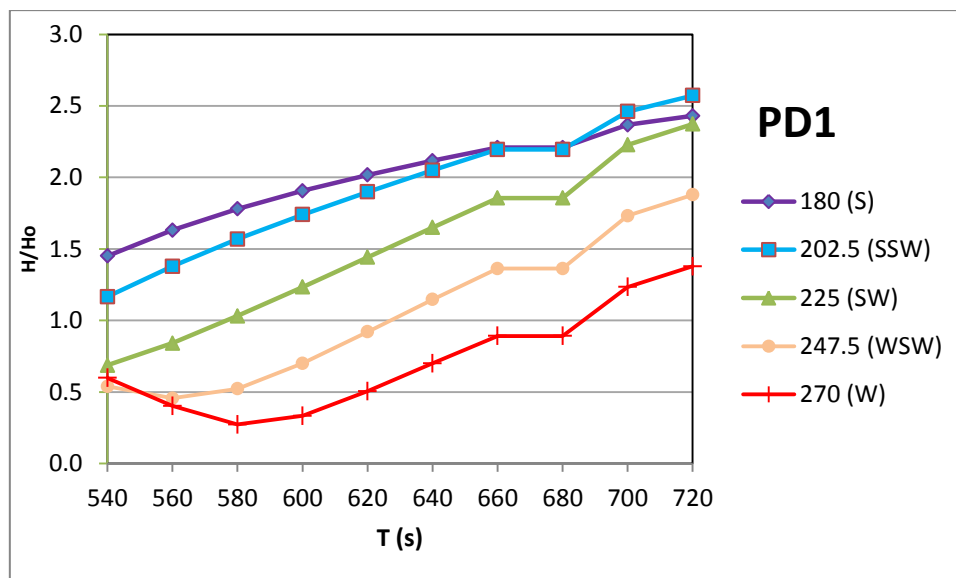


Figura 40 - Curvas de resposta para o ponto PD1, nível de maré de 2.0 m ZH, período de 540 s a 720 s e direção entre 180° (S) e 270° (W)

A título de exemplo, apresentam-se os coeficientes de amplificação em todo o domínio para a direção de ondas de S (180°) e períodos de $T=160$ s e $T=720$ s (Figura 41).

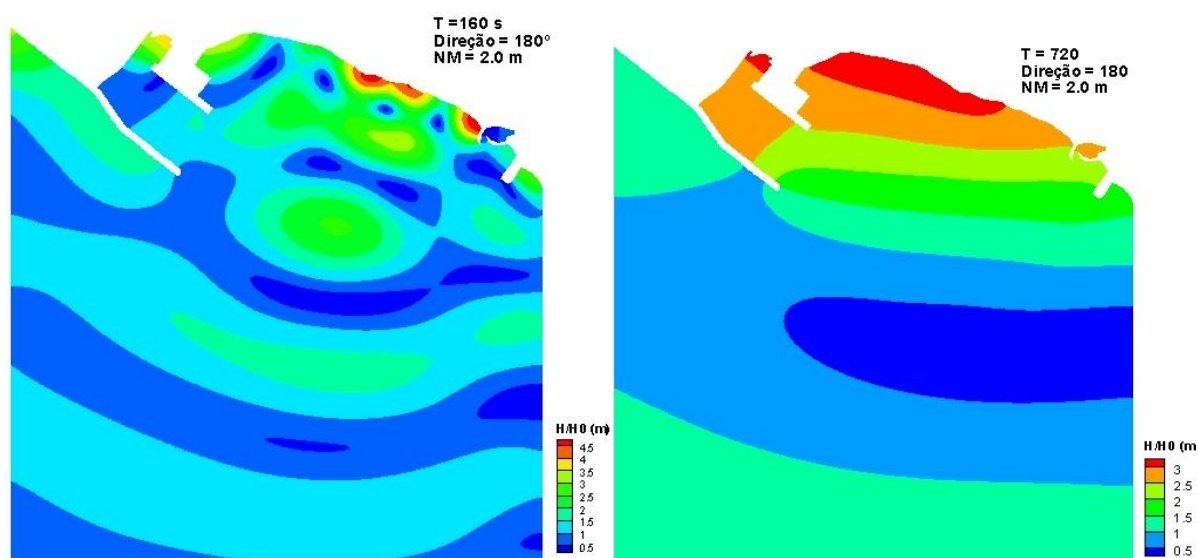


Figura 41 - Amplificação da onda para $T= 160$ s e $T= 720$ s, direção de onda de 180° (S), nível médio de maré 2.0 m ZH

Na Tabela 17 apresenta-se um resumo dos principais períodos de ressonância, T_r , direção, θ , e coeficientes de amplificação, H/H_0 obtidos em todos os pontos do domínio de cálculo.

Tabela 17 - Principais períodos de ressonância, Tr, direção, θ , e coeficiente de amplificação, H/H_0 , obtidos em todos os pontos do domínio de cálculo.

Ponto	T(s)	Tr(s)	$\theta(^{\circ})$	H/H_0
PD1	140<T<240	160.00	180.00	1.47
PD2	140<T<240	160.00	180.00	1.01
PD3	140<T<240	240.00	180.00	1.28
PD4	140<T<240	160.00	180.00	1.71
PD5	140<T<240	160.00	180.00	3.70
PD1	540<T<720	720.00	202.50	2.46
PD2	540<T<720	720.00	202.50	2.79
PD3	540<T<720	720.00	202.50	3.01
PD4	540<T<720	720.00	202.50	3.06
PD5	540<T<720	720.00	202.50	3.02

Em geral, para o nível de maré de +2.0 m (ZH), para as várias direções de onda incidente e para os pontos 1, 2, 3, 4 e 5 verificou-se que ocorrem fenômenos de ressonância para as duas gamas de períodos de onda incidente, 140-240 s e 540-720 s. Os maiores valores dos coeficientes de amplificação ocorrem na zona mais interior do Terminal XXI (pontos PD4 e PD5), para a gama de 540 s a 720 s e direção de 202.5° (SSW), tendo o maior valor sido obtido para o período de 160 s e direção de 180° (S). O ponto PD5 é o que está normalmente associado aos valores mais elevados do coeficiente de amplificação.

Embora os valores do coeficiente de amplificação obtidos não tenham sido superiores a 3.5 para qualquer direção de onda incidente simulada, as velocidades correspondentes apresentam valores significativos, especialmente ao longo do cais. Essas velocidades podem causar problemas para os navios atracados no local. Além disso, a zona nodal ao longo do cais de acostagem situa-se mais próximo da entrada do porto interior no caso dos menores períodos de ressonância e afasta-se dessa zona para os períodos mais elevados.

Relativamente ao modo de oscilação da bacia, verifica-se, em geral que existe uma oscilação bi-nodal (zonas com amplitude nula e velocidade máxima) no interior da bacia portuária, com um período ressonante principal na gama dos 140-240 s (ponto PD5). Na zona do cais de acostagem verifica-se uma oscilação uni-nodal para todas as gamas de períodos.

5 CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

A presente dissertação teve como principal objetivo a caracterização da agitação marítima de curto período no interior do Terminal XXI do Porto de Sines no período de Maio de 1988 a Junho de 2012 e avaliar a ressonância da referida bacia portuária, utilizando os modelos numéricos de propagação de ondas SWAN (Booij *et al.*, 1999) e DREAMS (Fortes 1993), além de analisar o desempenho dos referidos modelos.

Para a caracterização da agitação marítima ao largo foram utilizados os dados da boia-ondógrafo denominada por Sines1d, localizada ao largo de Sines, durante o período de Maio de 1988 a Junho de 2012. A caracterização das condições de agitação marítima na zona exterior e interior do Terminal XXI do porto de Sines no período em estudo foi possível através de um acoplamento de modelos numéricos de propagação de ondas, modelos SWAN e DREAMS. A motivação da utilização de dois modelos deve-se às limitações inerentes aos próprios modelos, não existindo um modelo que permita uma propagação de ondas desde tão vasta região até ao interior da bacia portuária e contemplando todos os fenómenos associados à propagação da agitação.

Com as características de agitação incidente na entrada da bacia portuária do Terminal XXI e os coeficientes de reflexão de cada um dos troços que definem as fronteiras do domínio de cálculo definidos, foi possível realizar os cálculos com o modelo DREAMS e, desta forma caracterizar a agitação marítima no interior da bacia portuária durante o período de Maio de 1988 a Junho de 2012. Os resultados permitem concluir que as obras de proteção do Terminal são eficazes na proteção da bacia portuária para os maiores valores de altura de onda significativa, levando a uma forte redução das alturas de onda desde o largo até ao interior da bacia.

Da validação dos modelos no período de 1 a 4 de novembro de 2011, conclui-se que o modelo SWAN representa bem a realidade em termos de altura significativa e período de pico, sendo os dados medidos pelo ADCP em frente à praia de S. Torpes e os resultados do modelo nesse ponto, em geral, bastante semelhantes. Em termos de direção de pico, os resultados do modelo distanciam-se mais dos medidos pelo ADCP. Relativamente ao modelo DREAMS, conclui-se que em termos de altura de onda significativa, os resultados do modelo seguem a agitação real medida pelo marégrafo e relativamente ao período de pico, este apresentou uma maior diferença entre valores, especialmente no dia 2 de Novembro. É de notar que estes dados foram obtidos sem qualquer calibração prévia dos modelos SWAN e DREAMS.

Relativamente aos fenómenos de ressonância, da aplicação do modelo DREAMS verificou-se que ocorre ressonância na bacia do Terminal XXI para as duas gamas de períodos de onda incidente, 140-240 s e 540-720 s. Os maiores valores dos coeficientes de amplificação ocorrem na zona mais interior do Terminal XXI, para a gama de 540 s a 720 s e direção de 202.5° (SSW), tendo a maior amplificação de altura de onda sido obtida para o período de 160 s e direção de 180° (S). Relativamente ao modo de oscilação da bacia, verifica-se que, em geral, existe uma oscilação bi-nodal no interior da bacia portuária, com um período ressonante principal na gama dos 140-240 s, enquanto na zona do cais de acostagem a oscilação é uni-nodal para todas as gamas de períodos.

Como desenvolvimentos futuros seria interessante, relativamente ao modelo SWAN, incluir o campo de ventos e correntes, variar o nível de maré e realizar uma calibração do modelo. Em relação ao modelo DREAMS, propõe-se a variação do nível de maré e a respetiva calibração do modelo.

BIBLIOGRAFIA

- [1]. BERKHOFF, J.C.W. (1972). Computation of combined refraction-diffraction. Proc. 13th International Conference in Coastal Engineering, Vancouver, Canada, Vol. 2, pp. 471-490.
- [2]. BOOIJ, N., RIS, R.C., HOLTHUIJSEN, L.H. (1999). A third-generation wave model for coastal regions, Part I, Model description and validation, J. Geoph. Research, 104, C4, 7649-7666.
- [3]. CAPITÃO, R., NEVES, M.G., PINHEIRO, L.V., FORTES, C.J.E.M. (2013a). An analysis of the response of Sines' Terminal XXI basin to long waves action. 6th SCACR – International Short Course/Conference on Applied Coastal Research, 5-7 Jun, Lisboa
- [4]. CAPITÃO, R., NEVES, M.G., FORTES, C.J.E.M., PINHEIRO, L.V. (2013b). Estudos de ressonância na bacia do Terminal XXI do Porto de Sines. 8^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, Lisboa, 10 a 11 de Outubro, PIANC Portugal
- [5]. FERNANDEZ, J.R. (2011). Internship Report. Trabalho de estágio. Laboratório Nacional de Engenharia Civil, Lisboa.
- [6]. FORTES, C.J.E.M. (1993). Modelação matemática da refração e difração combinadas de ondas marítimas. Análise pelo método dos elementos finitos. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior Técnico.
- [7]. FORTES, C.J.E.M.; COVAS, J.M.A.; FERNANDES, J.L.M. (1997). Harbour resonance and wave agitation studies in Baleeira's harbour by using the mathematical model DREAMS. Proc. 3rd Int. Conference WAVES 97 – Ocean wave Measurement and Analysis, ASCE, Vol. 2, pp. 1495-1509. Virginia, USA.
- [8]. FORTES, C.J.E.M., NEVES, M.G., PINHEIRO, L.V., MATOS, L. (2009). Estudo de ressonância portuária na bacia de adução de Sines. 6^as Jornadas Portuguesas de Engenharia Costeira e Portuária, AIPCN/PIANC, Funchal, Outubro
- [9]. FORTES, C.J.E.M., PINHEIRO, L.V., NEVES, M.G., CAPITÃO, R. (2012). Estudo de ressonância da bacia portuária do Terminal XXI. Relatório de progresso. Relatório 98/2012, DHA/NPE, LNEC, Abril.
- [10]. KOMEN, G.J., CAVALERI, L., DONELAN, M., HASSELMANN, K., HASSELMANN, S., JANSSEN, P.A.E.M., 1994. *Dynamics and Modelling of Ocean Waves*, Cambridge University Press, 532 p.
- [11]. NEVES, M. G. (1996). Ondas de longo período em Sines. Recursos Hídricos, APRH, Vol. 12, N.º 1, 75-82
- [12]. NEVES, M. G., CAPITÃO, R. e J. A. SANTOS (2004). Wave groups: their characterization and effects on moored ships. ISOPE2004, França, 485-491
- [13]. NEVES, M.G., PINHEIRO, L.V., CAPITÃO, R., FORTES, C.J.E.M. (2013). Estudo da ressonância da bacia portuária do Terminal XXI. 2º Relatório de progresso. Relatório 24/2013, DHA/NPE, LNEC, Janeiro.
- [14]. NEVES, D.R.C.B. (2009). Utilização de um sistema de informação geográfica na modelação numérica de propagação de ondas em zonas portuárias. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Geográfica, Geofísica e Energia da Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, Lisboa, 1 vol.
- [15]. SANTOS, J.A., DIDIER, E., NEVES, M. G., FERREIRA, O., GIL, L., MATIAS, A. (2002). Cross-Shore long-wave propagation at Ria Formosa (Portugal). International Conference on Coastal Engineering, Cardiff, Vol. 1, 1062-1074
- [16]. SWAN Team, 2008. "SWAN: Technical Documentation. SWAN Cycle III version 40.51", Delft University of Technology.

- [17].SWAN Team (2010a). SWAN: Scientific and Technical Documentation – SWAN Cycle III version 40.85. Faculty of Civil Engineering and Geosciences of Delft University of Technology, Netherlands.
- [18].SWAN Team (2010b). SWAN: User Manual– SWAN Cycle III version 40.85. Faculty of Civil Engineering and Geosciences of Delft University of Technology, Netherlands.